

TESIS CARRERA DE INGENIERÍA NUCLEAR

**MODELADO DE VÁLVULAS DE ACCIONAMIENTO  
PASIVO MEDIANTE LA TÉCNICA DE SÓLIDOS  
INMERSOS**

**Sergio Nabil Gadur**

**Dr. Enzo Alberto Dari**

Director

**Dr. Maximiliano Alejandro Palacios Amaya**

Co-director

**Miembros del Jurado**

Dr. Enzo Alberto Dari (Instituto Balseiro)

Dr. Maximiliano Alejandro Palacios Amaya (Universidad Nacional del Comahue)

Dr. Pablo García Martínez (Universidad Nacional de Río Negro)

Dr. Mario Scheble (Instituto Balseiro)

12 de Junio de 2017

Departamento de Mecánica Computacional del Centro Atómico  
Bariloche

Instituto Balseiro  
Universidad Nacional de Cuyo  
Comisión Nacional de Energía Atómica  
Argentina



A mi abuelo José César Basile, que por razones de la vida no se encuentra presente entre nosotros.

A mi mamá Roxana, mi abuela Julia, mi hermano Alejo y mi papá Sergio.

En orden de aparición:

A Carlos Díaz Llabra.

A Exequiel Díaz.

A Diego Flores Marottzi.



# Índice de contenidos

Índice de contenidos	v
Resumen	vii
Abstract	ix
1. Introducción	1
2. Válvulas de accionamiento pasivo en instalaciones nucleares	3
2.1. Sistemas de Seguridad Importantes en reactores Experimentales . . . . .	3
2.1.1. Sistemas de Seguridad: . . . . .	3
2.1.2. Sistemas relacionados con la Seguridad: . . . . .	4
2.1.3. Sistema de Protección del Reactor: . . . . .	4
2.2. Reactor RA-6 . . . . .	4
2.3. Sistema Clapeta . . . . .	9
3. Resolución numérica de las ecuaciones de Navier Stokes con sólidos inmersos	13
3.1. Ventajas de usar Fluidodinámica Computacional . . . . .	13
3.2. Interacción fluido-estructura: modelo matemático . . . . .	14
3.3. Método ALE . . . . .	14
3.3.1. Algoritmos Lagrangianos . . . . .	14
3.3.2. Algoritmos Eulerianos . . . . .	15
3.3.3. Descripción ALE . . . . .	15
3.4. Enfoques para sólidos inmersos . . . . .	15
3.5. Ecuaciones de movimiento . . . . .	17
3.6. Aproximación del método de elementos finitos . . . . .	19
3.7. Algoritmo híbrido Inmerso/adaptado al cuerpo . . . . .	19
3.8. General Purpose Finite Element Program (GPFEP) . . . . .	22
3.9. Programación computacional en paralelo . . . . .	23

<b>4. Validación del código</b>	<b>25</b>
4.0.1. Discretización del dominio . . . . .	26
4.0.2. Malla Simétrica . . . . .	26
4.0.3. Aplicación del código . . . . .	28
4.0.4. Cilindro 2D . . . . .	28
4.0.5. Flujo 2D alrededor de un cilindro fijo en el espacio. . . . .	31
4.0.6. Flujo estable: $Re = 30$ . . . . .	31
4.0.7. Flujo inestable: $Re = 100, 185$ . . . . .	31
4.0.8. Para $Re = 200, 300$ . . . . .	33
<b>5. Simulación numérica de la clapeta</b>	<b>35</b>
5.0.1. Modelado 2D . . . . .	35
5.0.2. Análisis del caso 3D . . . . .	35
5.0.3. Análisis del caso 2D . . . . .	37
5.1. Aplicación: Clapeta 2D . . . . .	38
5.1.1. Generación de una malla estructurada para el sólido inmerso (la clapeta) . . . . .	38
5.1.2. Elección del tipo de malla . . . . .	39
5.2. Flujo Estacionario . . . . .	43
5.3. Flujo Transitorio . . . . .	48
5.3.1. Transitorio: Pérdida del caudal del circuito de refrigeración pri- mario. . . . .	48
5.3.2. Circulación Forzada: Ascendente vs Descendente . . . . .	48
5.4. LOFA . . . . .	49
5.4.1. Eventos iniciantes contribuyentes: . . . . .	49
5.4.2. Parada de bomba del primario . . . . .	49
5.5. Modelado del transitorio. . . . .	50
5.5.1. Cálculo de la velocidad del refrigerante. . . . .	50
<b>6. Conclusiones y trabajos futuros</b>	<b>59</b>
6.1. Conclusiones . . . . .	59
6.2. Propuestas Futuras . . . . .	60
<b>A. Proyecto y Diseño</b>	<b>61</b>
<b>Agradecimientos</b>	<b>65</b>

# Resumen

En la presente tesis se realiza el análisis y evaluación del tiempo de apertura de válvulas de accionamiento pasivo del reactor experimental RA-6, junto con el modelado numérico de su dinámica ante un evento iniciante. Estas válvulas se encuentran completamente inmersas en el tanque del reactor y permiten pasar al modo de refrigeración por convección natural. Este modo sólo puede estar activo si la potencia del reactor es inferior a 200 kW y suele activarse ante transitorios provocados por determinados eventos inciantes en la planta.

En particular, se modelará un evento iniciante de pérdida del motor de la bomba del circuito de refrigeración primario, con posterior actuación de las válvulas clapeta.

En el modelado numérico de este problema de interacción fluido-estructura se utilizó un método híbrido, el cual implementa la técnica de sólidos inmersos y la formulación ALE para la descripción del movimiento de las mallas tanto del fluido como del sólido. Al mismo tiempo se utilizó el sistema GPFEP como herramienta computacional para la resolución mediante el método de elementos finitos de las ecuaciones que gobiernan la física del problema.

Antes de simular el problema de interés, se realizó la validación del código mediante un problema típico de sólido inmerso. Tal es el caso de un flujo incompresible que atraviesa un canal rectangular con un obstáculo circular. Se simularon distintos números de Reynolds, se calcularon los coeficientes de drag, y los números de Strouhal. Se compararon estos resultados con los obtenidos por distintos autores que se mencionan en la Bibliografía.

Posteriormente, se redujo el problema de las válvulas clapeta a un caso bidimensional, conservando cantidades físicas representativas del problema a analizar, con el objetivo de disminuir el costo computacional. Se simuló un transitorio en el caudal del sistema de refrigeración primario, correspondiente al evento iniciante antes mencionado.

Se pudo observar la evolución del campo de presión, la misma muestra que existe una presión crítica a partir de la cual se produce la apertura de las válvulas clapeta.

El programa permite visualizar la dinámica del movimiento de las válvulas clapeta mientras las mismas se abren. Simultáneamente se observó que la malla del fluido se adapta de manera efectiva al sólido, acompañando el movimiento de la válvula, resultado

de la adecuada implementación de la formulación ALE para mallas móviles.

**Palabras clave:** MÉTODO DE SÓLIDOS INMERSOS, VÁLVULAS CLAPETA



# Abstract

In the present thesis, the analysis and evaluation of the opening time of passive valves of the experimental reactor RA-6, together with the numerical modeling of its dynamics due to a starting event, is performed. These valves are completely immersed in the tank of the reactor and allow to pass to the natural convection cooling mode. This mode can only be active if the power of the reactor is less than 200 kW and is usually activated after a starting event is induced in the plant.

In particular, the starting event of loss of the pump motor of the primary cooling circuit will be modeled, with subsequent actuation of the flap valves.

In the numerical model of this fluid-structure interaction problem, a hybrid method was used, which implements the immersed solids technique and the ALE formulation for the description of both mesh movements coming from the fluid and the solid. At the same time, the GPFEP system was used as a computational tool to solve via the finite element method the equations that govern the physics of the problem.

Before simulating the problem of interest, a code validation was performed considering a well-known solid immersed problem. Such is the case of an incompressible flow passing across a rectangular channel which contains a circular obstacle. Different Reynolds numbers were simulated, drag coefficients, and Strouhal numbers were calculated. These results were compared with those obtained by different authors mentioned in the Bibliography.

Afterward, the problem of valves was reduced to a two-dimensional case, preserving representative physical quantities of the problem to be analyzed, in order to reduce the computational cost. A transitory state was simulated in the flow rate of the primary cooling system, corresponding to the aforementioned starting event.

It was possible to observe the evolution of the pressure field, it shows that there is a critical pressure for which the opening of the flap valves takes place.

The program allows to visualize the dynamics of the movement of the flap valves as they open. At the same time, it was observed that the mesh of the fluid adapts effectively to the solid, accompanying the movement of the valve, resulting from the proper implementation of the ALE formulation for mobile meshes.

**Keywords:** ARBITRARY LAGRANGIAN EULERIAN, LOSS OF COOLANT ACCIDENT, BLACKOUT, LOSS OF FLOW ACCIDENT



# Capítulo 1

## Introducción

*“El error siempre está entre el teclado y la silla.”*

---

Es primordial para el licenciamiento, puesta en marcha y operación de un reactor nuclear hacer un análisis determinista de seguridad, este proceso amerita la evaluación del comportamiento del reactor frente a un corte total de energía eléctrica (**blackout**), o una pérdida de flujo en el sistema de refrigeración primario (**LOFA**), o un evento de pérdida de refrigerante en el sistema de refrigeración primario (**LOCA**).

El reactor RA-6 cuenta con válvulas de accionamiento pasivo en el interior de su tanque, el objetivo de estos dispositivos es activar la convección natural ante un evento iniciante de pérdida de flujo en el circuito de refrigeración primario. En términos físicos elementales, la actuación de estas válvulas depende de la gravedad y del flujo que se establece en el circuito primario, nuestro objetivo es simular la dinámica de este dispositivo ante un evento iniciante.

Las válvulas clapeta son mecanismos pasivos de seguridad, ya que se accionan por su propio peso ante un evento iniciante de pérdida de flujo en el circuito de refrigeración primario, las mismas se encuentran generalmente en reactores nucleares de tipo MTR, es decir, reactores de baja potencia como el RA-6. En el capítulo 2 se analizará con más detalle el funcionamiento de este dispositivo.

En este trabajo se desarrollará el modelo físico de las válvulas de accionamiento pasivo, éste nos conduce a las ecuaciones de cuerpo rígido para la clapeta, las cuales no presentan mayores dificultades. Para el fluido, sin embargo, se llega a las ecuaciones de Navier Stokes, que sólo son resolubles por métodos numéricos. Además, la región del fluido es variable, por el movimiento de la válvula, luego es necesario acoplar ambas ecuaciones en forma dinámica. Una forma de resolver este problema es mediante la técnica de sólidos inmersos, que presentaremos en el capítulo 3.

Posteriormente, en el capítulo 4 desarrollaremos aspectos relacionados con la validación del código, mientras que en el capítulo 5 vamos a exponer los resultados obtenidos

de la dinámica de movimiento de la clapeta. Por último, en el capítulo 6 mencionamos conclusiones y propuestas futuras pertinentes a este trabajo.

# Capítulo 2

## Válvulas de accionamiento pasivo en instalaciones nucleares

### 2.1. Sistemas de Seguridad Importantes en reactores Experimentales

La seguridad nuclear aporta soporte al diseño y al licenciamiento a través de las siguientes etapas:

- Identificación de los Eventos Iniciantes.
- Estrategia de control de los eventos iniciantes: seguridad intrínseca y sistemas de ingeniería.
- Metodologías para evaluar el grado de seguridad para el soporte al diseño y su licenciamiento: Determinista y Probabilista.
- Clasificación de seguridad de estructuras, sistemas y componentes para establecer requisitos de diseño en base a la importancia de éstas para controlar y mitigar los eventos iniciantes.

#### 2.1.1. Sistemas de Seguridad:

- Barras Absorbentes.
- Inyección de Boro.
- Drenaje del tanque reflector
- Sistema de refrigeración de emergencia.
- Clapetas de Convección natural.

- Rompesifones.

### 2.1.2. Sistemas relacionados con la Seguridad:

- Volantes de Inercia.
- Chimenea.

### 2.1.3. Sistema de Protección del Reactor:

- Es el encargado de detectar desviaciones en la operación normal del reactor y demandar los sistemas de seguridad (aquellos con disparo activo).

## 2.2. Reactor RA-6

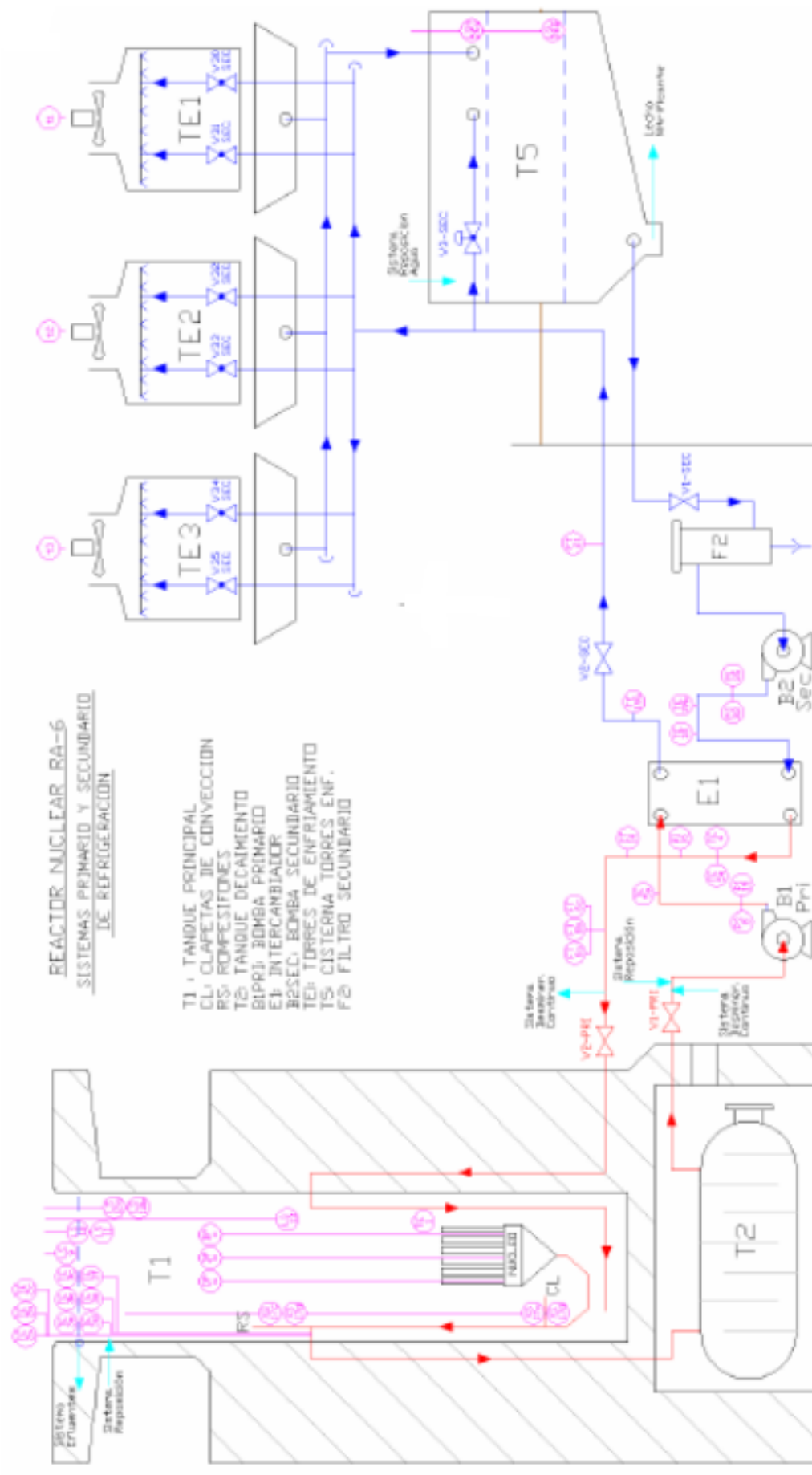
El reactor experimental RA-6 emplazado en el predio del Centro Atómico Bariloche, es un reactor tipo “open pool”, que actualmente cuenta con una potencia de 1MW, y podría llegar en un futuro a 3MW. Su propósito principal es la irradiación de materiales, aunque actualmente se están probando nuevas técnicas de irradiación para el tratamiento de tumores de personas (sistema BNCT).

El sistema de refrigeración primario cuenta con una bomba, un tanque de decaimiento, un intercambiador de calor, y el tanque del reactor. El fluido refrigerante es agua liviana.

La planta tiene dos modos de funcionamiento:

1. **Operación normal:** la refrigeración en el sistema primario está impuesta por la bomba del primario, es decir que el reactor se halla refrigerado por convección forzada. En el circuito de refrigeración primario el refrigerante entra por la pared derecha del tanque del reactor como se muestra en la Figura 2.1, desciende hasta el toroide inferior, se redistribuye y luego asciende hasta llegar al tope del núcleo. A partir de allí desciende por el núcleo, en este momento el refrigerante es calentado por la energía que se libera por las fisiones del  $U^{235}$ , y sale por la pared izquierda, luego se dirige hacia el tanque de decaimiento. Posteriormente pasa por la bomba, y sigue hacia el intercambiador de calor, en esta instancia el fluido es enfriado por el refrigerante del circuito de refrigeración secundario, sin intercambio de masa, y por último el refrigerante regresa al tanque del reactor.

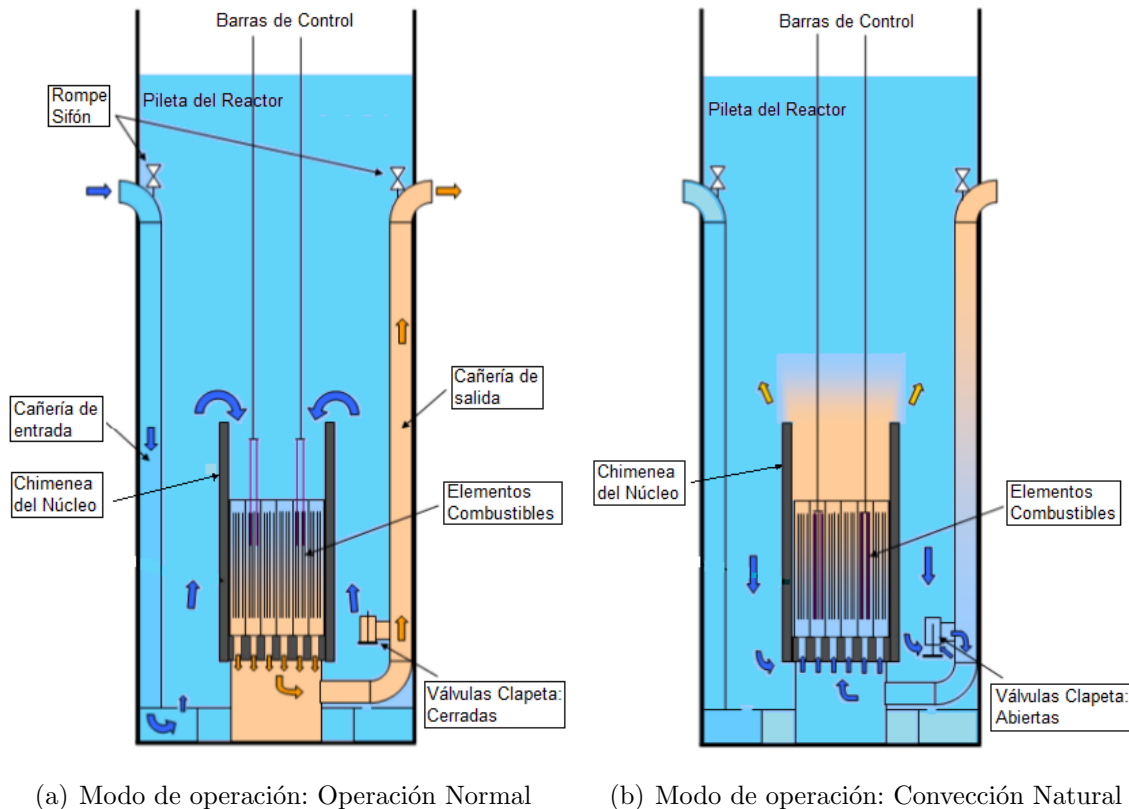
El reactor RA-6 cuenta con un caudal en el sistema de refrigeración primario de  $340 \frac{m^3}{h}$ , lo cual equivale a una velocidad media en las tuberías del primario de  $5 \frac{m}{s}$ .



**Figura 2.1:** Sistema de Refrigeración primario en modo Operación Normal.

2. **Convección natural:** la refrigeración en el reactor está impuesta por el caudal que se establece por convección natural cuando el fluido atraviesa el núcleo, el lazo se cierra a través de un dispositivo de seguridad llamado Válvulas Clapeta.

Este reactor puede operar hasta 200 kW de potencia mientras se encuentre en este régimen con las válvulas clapeta abiertas.



**Figura 2.2:** Modos de operación del reactor nuclear RA-6.

La Figura 2.2a muestra que en Operación Normal, el sistema clapeta (compuesto por dos válvulas clapeta) se encuentra inactivo, es decir que las válvulas están cerradas debido a la diferencia de presión en las tapas de la misma. Ante algún evento iniciante (como por ejemplo: la pérdida de flujo en el circuito de refrigeración primario), las válvulas clapeta se abren, esto es, caen por su propio peso y permiten la recirculación del refrigerante por convección natural.

El corte de suministro eléctrico (denominado **BLACKOUT**) es el evento iniciante de mayor probabilidad en el reactor RA-6. En dicha situación el diseño prevé el cumplimiento de la función fundamental de seguridad de **control de reactividad** mediante la caída de las barras de seguridad por desmagnetización de los electroimanes que las sostienen, y el cumplimiento de la función fundamental de seguridad de **refrigeración**, mediante la adecuada refrigeración del núcleo a fin de preservar la integridad



estructural de los Elementos Combustibles (EECC) que lo componen.

La parada de bomba del primario puede darse debido al corte de suministro eléctrico o a la pérdida del motor (en caso de rotura), este evento se denomina **LOFA: Loss Of Flow Accident** (también se produce la parada de la bomba del secundario pero a fines prácticos la que importa es la del primario) y con ello una disminución del caudal refrigerante.

El criterio para calcular el caudal mínimo que debe pasar por el núcleo se deduce de un balance energético (térmico), lo que se busca es evitar en todo momento la temperatura de ebullición nucleada (**T<sub>ONB</sub>**) en las paredes de cada placa combustible.

Ante alguno de los eventos mencionados anteriormente, el reactor RA-6 cuenta con una serie de sistemas de seguridad para mitigarlos:

- Volante de inercia de la bomba del circuito de refrigeración primario.
- Rompe Sifones.
- Válvulas Clapeta.

El volante de inercia se halla solidario al eje de la bomba del primario, éste asegura un flujo de refrigerante tal que cumple con el criterio mencionado previamente, sin embargo este dispositivo actúa durante un breve periodo de tiempo y luego se produce el accionamiento de otro dispositivo de seguridad que es el sistema clapeta. Dicho volante establece el caudal remanente necesario para refrigerar las placas combustibles luego del SCRAM del reactor (es decir que este caudal dado por el volante de inercia acompaña a la potencia de decaimiento).

El sistema clapeta cuenta con dos válvulas clapeta, las cuales producen el cambio de dirección del refrigerante en el núcleo, para que se establezca un régimen de convección natural.

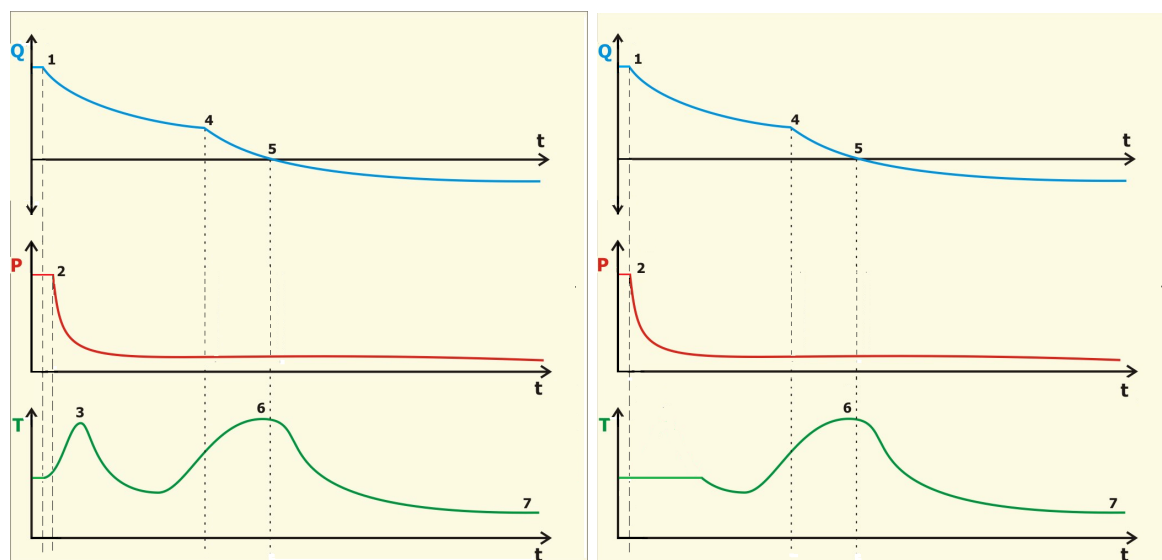
El sistema clapeta cumple con el criterio de falla única<sup>1</sup>, esto es, la apertura de una sola clapeta es suficiente para asegurar la refrigeración del núcleo por convección natural. Además, estas válvulas son independientes, es decir, que la falla de una no afecta a la falla de la otra.

Los Rompe Sifones son un conjunto de dos válvulas que se ubican en la tubería de entrada y la otra en la tubería de salida del RA-6, estas válvulas cuentan con una serie de orificios. La válvula de la tubería de entrada del tanque del reactor está abierta en operación normal, esto es para que el refrigerante a la entrada pueda mezclarse con el fluido que está estanco en la pileta del reactor, mientras que los orificios de la válvula que se encuentra en la tubería de salida están cerrados en operación normal y sólo se abren si ocurre algún evento de disminución de nivel en la pileta del reactor

---

<sup>1</sup>El criterio de falla única establece que a nivel sistema si falla un componente pero uno sólo, este sistema debe seguir cumpliendo su función, para ello suelen colocarse redundancias.

por ejemplo ante un **LOCA: Loss Of Coolant Accident**. Entonces, cuando ocurre un evento de disminución de nivel en pileta, estas válvulas se abren igualando presiones y rompiendo el efecto sifón, evitando el vaciamiento de la pileta.



(a) Pérdida del motor de la bomba del primario

(b) BLACKOUT

**Figura 2.3:** Evolución temporal del caudal por el núcleo, potencia de núcleo y temperatura de pared de placa del reactor RA-6, con actuación de los sistemas de protección.

En la Figura 2.3 se muestra un esquema de la evolución temporal esperada del caudal de refrigerante en el núcleo, potencia del núcleo y temperatura de pared de placa en un reactor de caudal descendente, como el RA-6, ante un evento de parada de bomba, con actuación de los sistemas de seguridad y apertura de válvulas clapeta para cambiar el modo de refrigeración del reactor de convección forzada a natural.

El punto 1 de la Figura 2.3 simboliza el evento de pérdida de flujo en el circuito primario de refrigeración, en primera instancia actúa el volante de inercia de la bomba del primario, allí se activa una señal de SCRAM del reactor y actúa el primer sistema de seguridad para apagar el reactor, esto ocurre en el punto 2.

El caudal por el núcleo y la potencia del núcleo descienden a medida que el tiempo transcurre, segundos posteriores se dan las condiciones tales para que las válvulas clapeta puedan abrirse por su propio peso, como se observa en el punto 4. En ese instante ocurre la inversión de flujo del refrigerante que pasa por el núcleo, debido a que en operación normal el caudal por el núcleo es descendente y al abrirse la válvula clapeta se establece un circuito de convección natural, pasando el caudal por cero en un instante de tiempo determinado, esto es el punto 5.

El punto 3 pertenece al pico de temperatura en la pared de las placas combustibles, sólo se da en el evento de pérdida de motor de la bomba del primario.

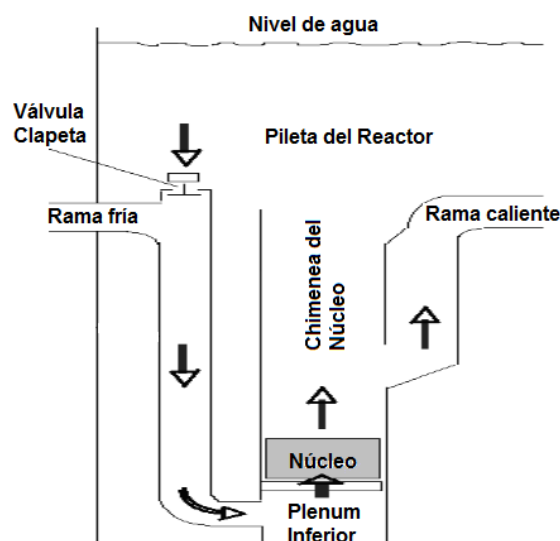
El punto 6 perteneciente al segundo máximo de temperatura ocurre por el efecto de la apertura de la clapeta, esto hace que el flujo primero disminuya y después aumente. Es importante aclarar que tanto el valor como el tiempo en el cual ocurre el pico de temperatura correspondiente al punto 6, dependen del momento en el cual la clapeta se abre.

El evento de pérdida del motor de la bomba del primario es más grave para la integridad de los EECC que el corte de energía eléctrica, ya que este último manda directamente SCRAM por desenergización de los electroimanes que sostienen las barras de seguridad, ver Figura 2.3b. En contraste, el evento de parada de la bomba del primario por pérdida del motor, tarda más tiempo en hacer saber que tiene que mandar SCRAM, es decir, la lógica protectora del RA-6 manda SCRAM por bajo caudal cuando éste está por debajo de  $306 \frac{m^3}{h}$ , esto es, cuando el caudal llega al 90 % de su valor nominal. El caudal que ingresa al tanque del reactor es medido a través de 3 Dp Cells.

Otra forma que tiene la lógica protectora del RA-6 para garantizar la correcta refrigeración de los EECC es medir pérdida de carga en el núcleo a través de unos sensores ubicados en boca de tanque y un sensor que indica la apertura de clapeta.

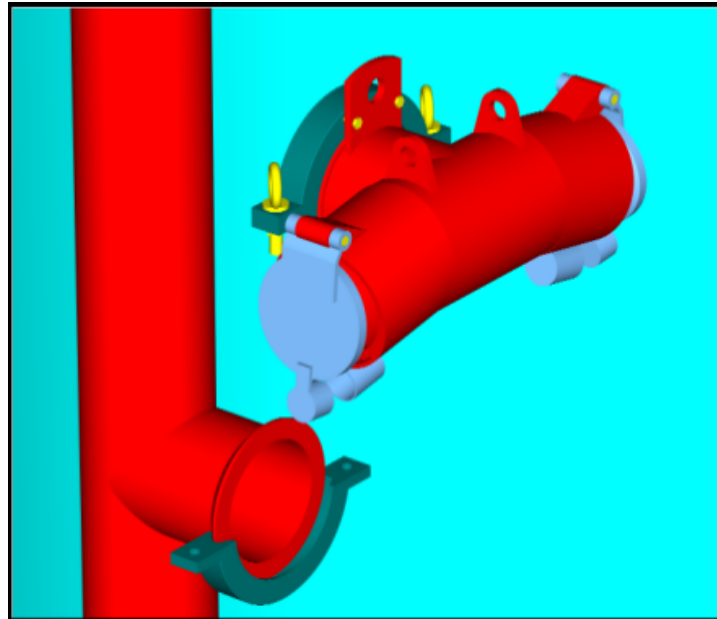
## 2.3. Sistema Clapeta

Debido al diseño del sistema primario de refrigeración el sistema clapeta se ubica en la rama de salida de la pileta del reactor RA-6 como se puede observar en la Figura 2.2a, mientras que en reactores experimentales con flujo ascendente como el de la Figura 2.4, el sistema clapeta se ubica en el límite superior de la rama de entrada de la pileta del reactor.

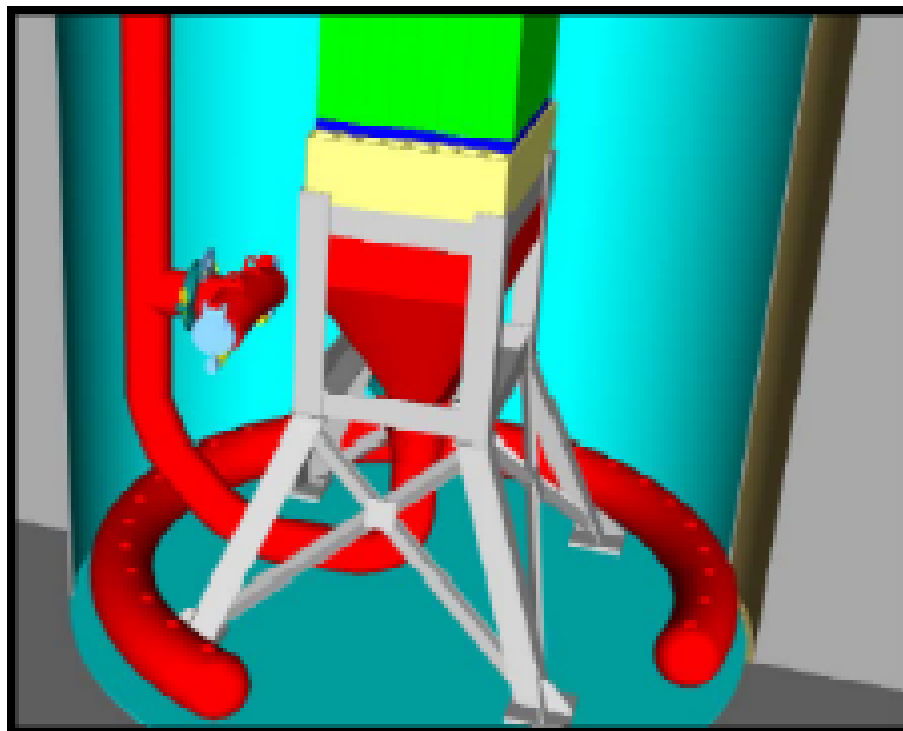


**Figura 2.4:** Reactor nuclear con flujo ascendente.

A continuación se muestra en la Figura 2.5 un esquema de las válvulas clapeta que se encuentran implementadas en el reactor RA-6. Por diseño las válvulas clapeta en este reactor experimental se ubican a la altura del plenum inferior, es decir, debajo del núcleo debido a que ante un evento de pérdida de agua en pileta, no habría oportunidad de que se establezca un circuito cerrado de convección natural y así garantizar la refrigeración de las placas combustibles, como se muestra en la Figura 2.6.



**Figura 2.5:** Válvulas Clapeta.



**Figura 2.6:** Ubicación de las válvulas clapeta.

El criterio de diseño de este sistema pasivo es evitar que las placas alcancen la temperatura de inicio de ebullición nucleada en todo momento, es decir que se debe cumplir tanto para el volante de inercia como para el sistema clapeta. Debido a que esto puede generar severos daños en las placas combustibles, ya que es un fenómeno que tiene una realimentación positiva, esto significa que las burbujas que se generan en el canal que alcanzó  $T_{ONB}$ , generan fricción al paso del refrigerante, lo cual provoca una redistribución del caudal ya que el mismo tendrá preferencia por ir por otros canales que le impongan menor fricción y de este modo el canal con burbujas comienza a quedar menos refrigerado respecto de los otros canales en los cuales no se alcanzó  $T_{ONB}$ .

Para ello se debe optimizar el tiempo de apertura de las válvulas clapeta ya que si la misma se abre muy tarde el caudal establecido por el volante de inercia es muy pequeño y no es suficiente para refrigerar en forma eficiente las placas combustibles, pudiendo éstas alcanzar  $T_{ONB}$ , sin embargo si la clapeta se abre muy temprano el caudal establecido por la clapeta probablemente es muy inferior al que se establecería en ese instante por el volante de inercia perdiendo así el caudal de refrigeración que nos puede otorgar dicho volante. Entonces se debe encontrar un óptimo para el tiempo de apertura de clapeta, este tiempo de apertura depende principalmente de la masa de la clapeta y en segundo lugar de la forma de la clapeta, aunque ésta última no es un parámetro que se pueda variar ya que el diámetro de los caños es fijo debido a que ya se tiene una configuración previa de la tubería del sistema de refrigeración primario del reactor RA-6, es decir que se deben dimensionar y masar las clapetas de forma adecuada para estar en el tiempo óptimo para no desperdiciar el caudal del volante de inercia si se abren muy pronto, ni tampoco obtener un caudal demasiado pequeño al hacer que se abran muy tarde.



## Capítulo 3

# Resolución numérica de las ecuaciones de Navier Stokes con sólidos inmersos

### 3.1. Ventajas de usar Fluidodinámica Computacional

En el ámbito de la investigación, el desarrollo y diseño, la herramienta fluidodinámica computacional (CFD por sus siglas en inglés) normalmente complementa la dinámica de fluidos experimental y teórica. Sin embargo, CFD tiene una serie de ventajas distintivas:

1. Se puede producir de manera barata y rápida, sin una cantidad extraordinaria de entrenamiento, aunque la interpretación de los resultados a menudo requiere experiencia. Sin embargo, mientras que el precio de muchos productos básicos aumenta, el costo computacional tiende a disminuir.
2. Permite cambios de parámetros sencillos. La herramienta CFD permite variar los parámetros de entrada fácilmente en amplias rangos, facilitando así la optimización del diseño. Tales variaciones suelen ser imposible o prohibitivas en estudios experimentales.
3. Tiene la capacidad de simular condiciones realistas. CFD puede simular flujos directamente bajo condiciones prácticas, a diferencia de los experimentos, en los que un modelo pequeño o teorías analíticas que sólo pueden ser válidas para limitar los casos en que un parámetro u otro es muy grande o pequeño.
4. Tiene la capacidad de simular condiciones ideales. CFD proporciona la conveniencia de cambiar ciertos términos en las ecuaciones de gobierno, lo que permite concentrar

la atención en parámetros esenciales y eliminar todas las características irrelevantes. Tal control paramétrico es típicamente imposible en experimentos.

5. Permite investigar situaciones no naturales o no deseadas. CFD permite que los eventos sean estudiados para que se haga todo lo posible para evitar, por ejemplo, conflagraciones, explosiones, o fallas en las centrales nucleares.
6. Permite investigar variables en todo punto del dominio computacional, incluso algunos que pueden ser imposibles de medir experimentalmente.

### 3.2. Interacción fluido-estructura: modelo matemático

En muchos problemas de ingeniería es de especial interés el estudio de problemas de interacción fluido-estructura, los cuales pueden ser descritos mediante la teoría de mecánica de fluidos por ejemplo las ecuaciones de Navier Stokes (NS) y la teoría de mecánica de partículas como por ejemplo las ecuaciones de cuerpo rígido.

Actualmente existen muchas alternativas para el tratamiento del problema del movimiento de un sólido inmerso completamente en un fluido. El estudio de sólidos inmersos es de interés en muchas ramas, ya que este análisis podría servir para simular desde válvulas cardíacas hasta válvulas de accionamiento pasivo de un reactor nuclear experimental, al mismo tiempo tiene aplicación en problemas de elasto-aerodinámica.

### 3.3. Método ALE

Existen dos tipos de formulaciones muy conocidas en el estudio de la dinámica de fluidos, una de ellas es la formulación Lagrangiana y la segunda es la formulación Euleriana. Sin embargo el enfoque que usaremos en el presente trabajo será una combinación entre los dos mencionados, llamado formulación Arbitrary Lagrangian Eulerian (ALE).

#### 3.3.1. Algoritmos Lagrangianos

Son aquellos en los que cada nodo individual de la malla computacional sigue a la partícula material asociada durante el movimiento, es decir que se mueven con el continuo, son principalmente usadas en mecánica de estructuras. La descripción Lagrangiana permite un fácil rastreo de superficies libres e interfases entre diferentes materiales. Esto además facilita el tratamiento de materiales con relaciones constitutivas dependientes de la historia. El punto débil de este tipo de algoritmos reside en



la capacidad de seguir grandes distorsiones del dominio computacional sin recurrir a fuertes operaciones de remallado.

### 3.3.2. Algoritmos Eulerianos

Son ampliamente usados en dinámica de fluidos, la malla computacional está fija y el continuo se mueve respecto a la grilla. En la descripción Euleriana, grandes distorsiones en el movimiento del continuo pueden ser manejados con relativa facilidad, pero generalmente a expensas de definición precisa en la interfaz fluido-estructura. Dicha formulación examina, a medida que evoluciona el tiempo, las cantidades físicas asociadas con las partículas del fluido que pasan a través de una región fija del espacio.

### 3.3.3. Descripción ALE

Los nodos de la malla computacional pueden ser movidos de alguna forma especificada arbitrariamente para dar la capacidad de rezonificación continua. Debido a esta libertad en el movimiento de la malla computacional ofrecido por la formulación ALE, mayores distorsiones del continuo pueden ser manejados respecto de lo que sería permitido por el método Lagrangiano y con más resolución que el proporcionado por el enfoque Euleriano. La formulación ALE tiene la capacidad de acomodarse a las distorsiones significativas de la malla computacional, mientras preserva una delineación clara de interfases, típico de un enfoque puramente Lagrangiano.

Para la resolución del problema planteado se empleó el método de elementos finitos con enfoque en la formulación ALE.

La malla de fluido cerca de la interfaz de contacto es tratada mediante el método ALE, con el fin de adaptar la malla del fluido a la malla de la estructura para los algoritmos de contacto, mientras que para seguir el movimiento del sólido se empleó la formulación Lagrangiana. La base matemática de la formulación ALE y los algoritmos de rezonificación son simples, pero su implementación es complicada debido a los tediosos cálculos geométricos asociados con el manejo de una malla arbitraria.

## 3.4. Enfoques para sólidos inmersos

En las últimas décadas han sido notorios los esfuerzos y avances en el uso de métodos inmersos para abordar problemas de interacción fluido-estructura.

Uno de los enfoques más usado es el de dominios inmersos: en este caso la malla de fluido está fija y el sólido impone condiciones de contorno sobre el fluido a través de los multiplicadores de Lagrange. En este trabajo se presentará un enfoque híbrido: se usará una malla de fluido la cual contiene al sólido sin remallar. Sin embargo estos nodos

## 16 Resolución numérica de las ecuaciones de Navier Stokes con sólidos inmersos

pueden moverse de forma tal que se ajusten al contorno del sólido, de esta manera evitamos el alto costo en los pasos de remallado, mientras reducimos los errores de interpolación producidos por elementos que contienen porciones parciales del sólido.

El método de dominio inmerso tiene como principal ventaja que la malla del fluido permanece fija, no necesita ni movimiento ni remallado. El principal problema de este enfoque es la falta de representación precisa en la interfaz sólido/fluido, lo cual conduce a una solución deficiente en la capa sólido/fluido. Esto se pone en evidencia cuando calculamos la fuerza de fluido que actúa sobre el sólido inmerso.

El enfoque más popular utiliza la formulación ALE, en la cual el cuerpo es representado de manera precisa porque la malla del fluido sigue el movimiento del sólido. En casos con grandes distorsiones de la malla del fluido, se debe realizar un remallado. Esto provoca que el método ALE tenga un alto costo computacional debido al remallado.

En este trabajo se usó un enfoque híbrido inmerso/ALE que, por un lado explica la interacción fluido-estructura usando las ideas del método inmerso, calculando las fuerzas sobre el sólido como multiplicadores de Lagrange ( $\lambda$ ) al igual que la imposición de la velocidad del sólido sobre la región del mismo. Pero en lugar de mantener la malla del fluido fija, ésta se adapta al cuerpo todo el tiempo (formulación ALE). En una cierta cantidad de pasos de tiempo la malla del fluido se reajusta con el fin de evitar la mala calidad de los elementos, esta acción se lleva a cabo mediante una malla de referencia (la malla de fluido original sin ajustar al cuerpo) y realizando el ajuste a los bordes del sólido, permitiendo que los nodos cercanos a la interfaz sólido/fluido se muevan. Este procedimiento de 2 pasos se llama reajuste de la malla del fluido. Por lo tanto la topología de la malla del fluido nunca cambia, esto significa que a lo largo de toda la simulación la metodología es tal que preserva el número de nodos, el número de elementos, y la conectividad.

En el enfoque híbrido se usan 2 mallas de fluido (con la misma topología) con el fin de reajustar el dominio de cálculo: la malla de referencia denotada por  $T_f^o$  que es la malla original utilizada para el dominio de cálculo que no necesariamente está ajustada al cuerpo, y la malla ajustada al cuerpo denotada por  $T_f^t$ . Si necesitamos hacer referencia a una etapa previa de la malla ajustada al cuerpo, hacemos referencia a ella como  $\bar{T}_f^t$ . Además el sólido se describe usando una tercera malla,  $T_s^t$  la cual se mueve como cuerpo rígido.

Con el fin de identificar los puntos en el dominio de fluido que ocupan una región del sólido, se calcularon un conjunto de funciones indicadoras  $\phi_f$ , en donde su nivel cero describe el contorno  $\Omega_s^t$ . Con esta herramienta se calculan las distancias de los nodos de fluido al sólido con el fin de determinar si un nodo de fluido está dentro o fuera del dominio del sólido  $\Omega_s^t$ .

La estrategia empleada es válida para sólidos rígidos o cuerpos deformables. Se usó el método de elementos finitos con la aproximación de Galerkin para la resolución

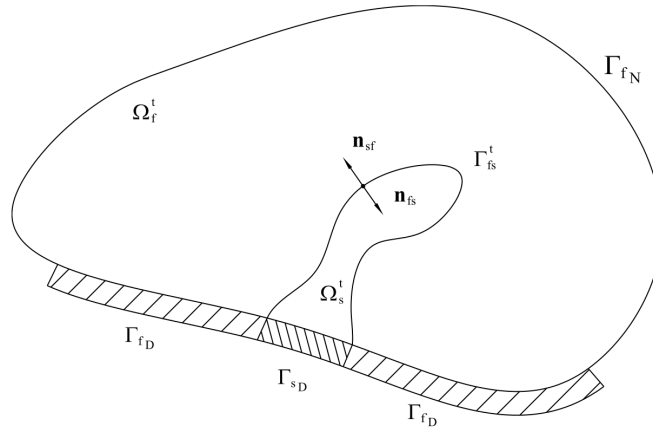
numérica del problema. En este caso, el problema de interés requería la interacción de flujo incompresible con cuerpos rígidos. Sin embargo para obtener la generalidad deseada en el algoritmo, el sólido también fue representado usando una malla de elementos finitos.

La idea esencial que yace detrás de este método es simular la región del sólido como si estuviera ocupada por fluido, es decir, un fluido ficticio en el cual se resuelven las ecuaciones de NS. A este fluido ficticio se le asignan las propiedades materiales que tiene el sólido como son la densidad del sólido, módulo de compresibilidad, etc.

### 3.5. Ecuaciones de movimiento

Sea  $\Omega \subset \mathbb{R}^{n_d}$  ( $n_d = 2, 3$ ) una región del espacio que no varía en el tiempo, siendo  $\Omega = (\Omega_f^t \cup \Omega_s^t)$ , con  $\Omega_f^t \cap \Omega_s^t = \emptyset$ . Los índices s y f hacen referencia a la región ocupada por el sólido y por el fluido respectivamente, y el supraíndice t hace referencia al tiempo t. Denotamos los contornos de Dirichlet por  $\Gamma_{fD}$  y  $\Gamma_{sD}$  y los contornos de Neumann por  $\Gamma_{fN}$  y  $\Gamma_{sN}$ .

En la Figura 3.1 se observan las regiones y contornos del problema a analizar.



**Figura 3.1:** Esquema general para el problema de interacción fluido-estructura.

Es menester notar que el sólido está inmerso para todo tiempo t. El problema es intrínsecamente dependiente del tiempo. Los campos de velocidad y presión son representados por  $\mathbf{v}$  y  $p$ , mientras que  $\rho$  y  $\mu$  son la densidad y la viscosidad respectivamente.

El sólido o el fluido pueden ser, independientemente, incompresibles o débilmente compresibles, siendo  $\kappa_s$  y  $\kappa_f$  los módulos de compresibilidad del sólido y del fluido.

Los tensores de tensiones de Cauchy del fluido y del sólido son:  $\boldsymbol{\sigma}_f = -p_f \mathbf{I} + \boldsymbol{\sigma}_{fD}$  y  $\boldsymbol{\sigma}_s = -p_s \mathbf{I} + \boldsymbol{\sigma}_{sD}$ .

El problema se considera siempre como un conjunto continuo, es decir que el movimiento del sólido está regido por las condiciones de presión y velocidad que se establecen en el fluido que se encuentra a sus alrededores. En este contexto, la cinemática

## 18 Resolución numérica de las ecuaciones de Navier Stokes con sólidos inmersos

del problema indica la continuidad del campo de velocidad a través de la interfase fluido-estructura  $\Gamma_{fs}^t$ . Entonces la condición:  $\mathbf{v}_f \simeq \mathbf{v}_s$  en  $\Gamma_{fs}$  es crucial.

El problema de interacción sólido-fluido admite la existencia de un dominio de fluido ficticio, resultando en un enfoque de dominio inmerso.

Al hacer uso del principio de los trabajos virtuales, se puede relajar la condición de continuidad de la velocidad a través de la interfase  $\Gamma_{fs}^t$  ya que al emplear los multiplicadores de Lagrange  $\lambda$  estos sirven como condición de vínculo entre el sólido y el fluido, dando continuidad al campo de presión.

Las ecuaciones Euler-Lagrange en el sentido de distribuciones son:

$$\begin{aligned}
 \rho_f \frac{D\mathbf{v}_f}{Dt} - \text{div} \boldsymbol{\sigma}_{fD} + \nabla p_f &= \rho_f \mathbf{g} & \text{en } \Omega_f^t, \\
 \rho_s \frac{D\mathbf{v}_s}{Dt} - \text{div} \boldsymbol{\sigma}_{sD} + \nabla p_s &= \rho_s \mathbf{g} & \text{en } \Omega_s^t, \\
 \nabla \cdot \mathbf{v}_f + \kappa_f \frac{Dp_f}{Dt} &= 0 & \text{en } \Omega_f^t, \\
 \nabla \cdot \mathbf{v}_s + \kappa_s \frac{Dp_s}{Dt} &= 0 & \text{en } \Omega_s^t, \\
 (-p_f \mathbf{I} + \boldsymbol{\sigma}_{fD}) \mathbf{n}_f &= \bar{\mathbf{t}}_f & \text{en } \Gamma_{fN}, \\
 \mathbf{v}_s &= \mathbf{v}_f & \text{en } \Gamma_{fs}^t, \\
 (-p_f \mathbf{I} + \boldsymbol{\sigma}_{fD}) \mathbf{n}_{fs} &= \boldsymbol{\lambda} & \text{en } \Gamma_{fs}^t, \\
 (-p_s \mathbf{I} + \boldsymbol{\sigma}_{sD}) \mathbf{n}_{fs} &= \boldsymbol{\lambda} & \text{en } \Gamma_{fs}^t.
 \end{aligned} \tag{3.1}$$

En el caso de análisis tanto el fluido como el sólido son incompresibles, esto es:

$$\begin{aligned}
 \kappa_f &= 0 & \Rightarrow \nabla \cdot \mathbf{v}_f &= 0 \\
 \kappa_s &= 0 & \Rightarrow \nabla \cdot \mathbf{v}_s &= 0
 \end{aligned} \tag{3.2}$$

donde la ecuación 3.2 es conocida como la ecuación de conservación de masa para un fluido incompresible.

El problema 3.1 se resolvió usando iteraciones de punto fijo, se separó en dos problemas principales, el del sólido y el del fluido. La solución del problema acoplado fue obtenida por iteraciones entre los dos problemas usando el método de Gauss Seidel. Este problema 3.1 implica integrar las ecuaciones de cuerpo rígido para el cálculo de la velocidad del centro de masa y los grados de libertad en la rotación. Para este propósito se utilizó un método implícito de 2° orden.

### 3.6. Aproximación del método de elementos finitos

El problema 3.1 implica resolver las ecuaciones de NS con una restricción en el campo de velocidad distribuída sobre  $\Omega_s^t$ . Para el problema del fluido 3.1, se empleó una interpolación de igual orden con una linealización de Newton para el término convectivo. El enfoque que se emepleará involucra mallas móviles (como se explica en la sección siguiente), por lo tanto la derivada material se define como:

$$\frac{D\mathbf{v}_f}{Dt} = \frac{\partial \mathbf{v}_f}{\partial t} + \nabla \mathbf{v}_f (\mathbf{v}_f - \mathbf{v}_m) \quad (3.3)$$

donde  $\mathbf{v}_m$  es la velocidad de la malla compatible con el marco de referencia ALE.

Cuando la malla necesita ser movida, se resuelve un problema de Laplace.

### 3.7. Algoritmo híbrido Inmerso/adaptado al cuerpo

Definiciones:

n: Solución en el paso de tiempo anterior.

k: Iteración el paso de tiempo anterior.

n+1: Solución en el paso de tiempo actual.

k+1: Iteración en el paso de tiempo actual.

$\mathbf{x}_j$ : Coordenadas de los nodos j-ésimos.

1. Se realiza el reinicio y reajuste de la malla de fluido (esto se hace siempre en el 1° paso de tiempo) como sigue:
  - a. Se restablece la malla ajustada por el cuerpo en el paso anterior  $\bar{T}_f^{tn}$ , es decir, volver a la malla de referencia  $T_f^0$  (esto no es necesario en el 1° paso).
  - b. Se ajusta la malla de fluido para adaptarla al cuerpo sólido.
    - i. Para el dominio del sólido  $\Omega_s^{tn}$  se calcula el conjunto de funciones indicadoras  $\phi_{f,0}^n$  en  $T_f^0$ .
    - ii. Se construye el conjunto  $N_{f,0}^{int,n}$  los nodos de fluido los cuales están en el dominio del sólido  $\Omega_s^{tn}$  y que pertenecen a elementos que son cruzados por la interfaz de sólido  $\partial\Omega_s^{tn}$  dada por la condición  $\phi_{f,0}^n = 0$ , y se determina la distancia  $d_{f,0}^n$  de estos nodos a tal interfase.
    - iii. Se mueve la malla de fluido resolviendo un problema de Laplace en  $T_f^0$  con condiciones de contorno de Dirichlet para los nodos en  $N_{f,0}^{int,n}$  igual a  $d_{f,0}^n$ , obteniendo la malla de fluido  $T_f^{tn}$ .

- c. Se realiza una interpolación lineal en el campo de la velocidad del fluido desde la malla del fluido ajustada al cuerpo en el paso anterior  $\bar{T}_f^{t_n}$  sobre la malla actual ajustada al cuerpo  $T_f^{t_n}$ , esto es, cambia la malla y hay que recalcular valores nodales.
- d. Para el dominio del sólido  $\Omega_s^{t_n}$ , se calcula el conjunto de funciones indicadoras  $\phi_f^n$  en  $T_f^n$ , éstas funciones serán usadas como indicador de la posición del sólido, y no es calculada de nuevo hasta que este mismo paso 1 se repita.
- e. Se toma como hipótesis inicial  $(.)^k = (.)^n$  para las iteraciones de fluido-estructura.
2. Se inicia la iteración fluido-estructura (pasar a través de los pasos 3 a 8).
3. Se calcula la velocidad de la malla de fluido  $\mathbf{v}_m^k$  como sigue:
  - a. Se construye el conjunto de nodos  $N_f^k$  nodos de fluido en la región de sólido  $\Omega_s^{t_{n+1},k}$  con el fin de calcular las funciones indicadoras  $\phi_f^k$  (no es necesario en la 1° iteración) y se recupera la velocidad del cuerpo sólido  $\mathbf{v}_{s,j}^k = \mathbf{v}_s^k(\mathbf{x}_j)$ ,  $\forall j \in N_f^k$  de la malla del sólido  $T_s^{t_{n+1},k}$ .
  - b. Se calcula una extensión para la velocidad de la malla de fluido  $\mathbf{v}_m^k$  resolviendo un problema de Laplace en  $T_f^{t_{n+1},k}$  con condiciones de contorno de Dirichlet para los nodos en  $N_f^k$  igual a  $\mathbf{v}_{s,j}^k$ ,  $\forall j \in N_f^k$ .
4. Se calcula  $(\mathbf{v}_f^{k+1}, p_f^{k+1}, \lambda^{k+1})$  resolviendo la ecuación 3.1 en  $T_f^{t_{n+1},k}$ , es decir, resolver las ecuaciones de Navier Stokes con el método ALE con una restricción sobre el conjunto de nodos  $N_f^k$  tal que la velocidad de estos nodos sea la velocidad de la malla, esto es,  $\mathbf{v}_f^{k+1}(\mathbf{x}_j) = \mathbf{v}_{s,j}^k$ ,  $\forall k \in N_f^k$ .
5. A partir de la malla de fluido  $T_f^{t_{n+1},k}$  se recupera  $\sum_{j \in N_f^k} \lambda_j^{k+1}$  para pasar esta información al problema del sólido.
6. Se resuelve el problema del sólido a partir de la ecuación 3.1, calculando  $\mathbf{v}_s^{o,k+1}$  y  $\Omega_s^{o,k+1}$ , y luego se transfiere la posición y la velocidad del sólido a la malla del sólido  $T_s^{t_{n+1},k}$ , además se calcula el desplazamiento correspondiente a  $\mathbf{u}_s^{k+1}$  en cada punto de la malla del sólido, de modo que a partir de  $T_s^{t_{n+1},k}$ , que es de  $\Omega_s^{t_{n+1},k}$  obtenemos la malla del sólido en la siguiente iteración  $T_s^{t_{n+1},k+1}$ , esto es  $\Omega_s^{t_{n+1},k+1}$ .
7. Con el desplazamiento del sólido  $\mathbf{u}_s^{k+1}$  calculado en el paso 6 se mueve la malla del fluido resolviendo un problema de Laplace en  $T_f^{t_{n+1},k}$  con condición de contorno de Dirichlet igual a  $\mathbf{u}_f^{k+1}(\mathbf{x}_j) = \mathbf{u}_s^{k+1}(\mathbf{x}_j)$ ,  $j \in N_f^k$  tal que obtenemos  $T_f^{t_{n+1},k+1}$ .
8. Se comprueba la convergencia usando los grados de libertad del sólido  $\mathbf{v}_s^o$  y  $\Omega_s^o$ :
  - a. Si se logró la convergencia entonces se debe hacer:  $(.)^{n+1} = (.)^{k+1}$  y saltar al paso 10.

- b. Si no se alcanzó la convergencia se debe calcular un parámetro de relajación  $\omega^k$  y se debe hacer:  $(.)^k = \omega^k(.)^{k+1} + (1-\omega^k)(.)^k$  y saltar al paso 2.
9. Se analiza la calidad de la malla del fluido  $T_f^{t_n}$ .
10. Se revisa la condición de reinicio y reajuste de la malla de fluido:
  - a. Si no es necesario reiniciar y reajustar entonces se debe hacer:  $(.)^k = (.)^n = (.)^{n+1}$ .
  - b. Si es necesario reiniciar y reajustar entonces pasar al paso 1.

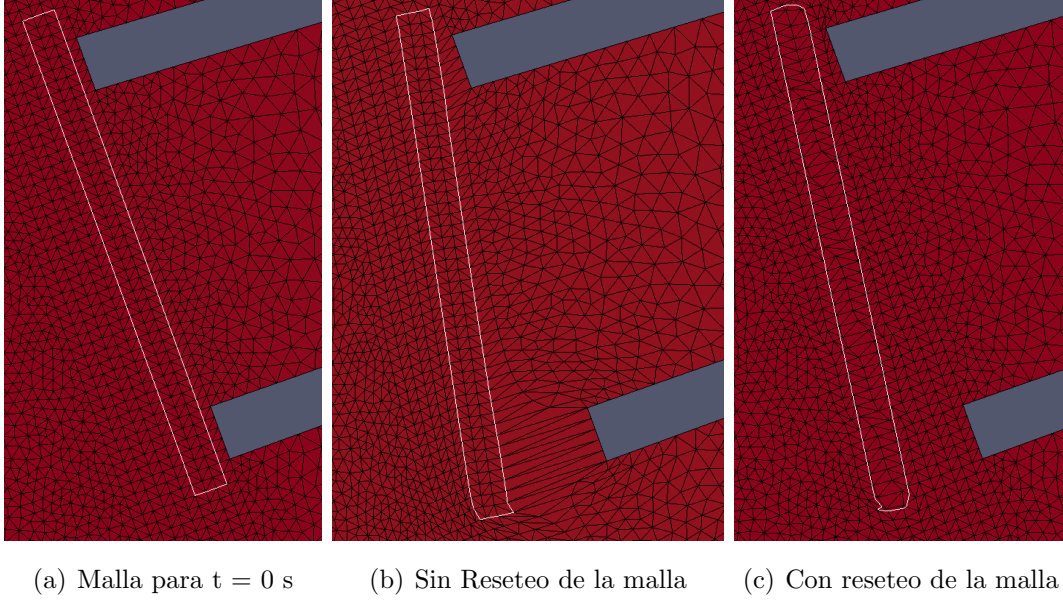
Observaciones:

- El índice 0 en el paso 1 denota las cantidades definidas en la malla de referencia  $T_{f,o}^{t_n}$ .
- El procedimiento de ajuste en la etapa 1b no asegura una buena calidad de la malla  $T_f^{t_n}$ . Algunos elementos dentro de la región del sólido  $\Omega_s^{t_n}$ , cerca del contorno  $\partial\Omega_s^{t_n}$ , pueden ser distorsionados. Esto no es un problema ya que el campo de velocidades va a ser restringido sobre los nodos pertenecientes a esos elementos.
- El paso 3b es necesario para propagar la velocidad de la malla en todo el dominio de fluido que va a ser utilizado por la formulación ALE.
- La malla del sólido  $T_s^{t_{n+1}}$  presente en los pasos 3a y 6 es necesaria para la generalidad del algoritmo. Esto no es estrictamente necesario para el caso de cuerpos rígidos, pero sería necesario para el caso de cuerpos deformables.
- El paso 8 del parámetro de relajación es calculado usando la aceleración de Aitken como en Borazjani et al. (2008).
- La condición de reinicio en el paso 10 puede basarse en un criterio dado sobre la distorsión de la malla o puede ser fijada, es decir, después de un cierto número de pasos de tiempo reiniciar la malla de fluido.

Con el fin de ejemplificar el reinicio y reajuste de la malla de fluido involucrados en el paso 1 se presenta la Figura 3.2.

En la Figura 3.2 a) se observa la posición del sólido para un dado paso temporal  $t_n$  para lo cual la malla de fluido se denota por  $T_f^{t_n}$ . En la Figura 3.2 b) se muestra la malla de fluido después de  $m$  pasos de tiempo, la cual es denotada como  $T_f^{t_{n+m}}$ . En esta Figura puede notarse que la malla del fluido acompaña el movimiento del sólido desde  $t_n$  hasta  $t_{n+m}$  (en este periodo de tiempo aún no se realizó ni el reinicio ni el reajuste de la malla de fluido). Esta malla se convertirá en la malla perteneciente al paso de tiempo anterior a la malla reiniciada y reajustada, por lo tanto cambiaremos los nombres a  $\bar{T}_f^{t_{n+m}} = T_f^{t_{n+m}}$ . Por último en la Figura 1c se presenta la nueva malla de

fluido ajustada al cuerpo  $T_f^{t_{n+m}}$  después de reiniciar y reajustar la malla de referencia  $T_f^o$ . Entonces cabe notar que se necesita interpolar información de  $\bar{T}_f^{t_{n+m}}$  a  $T_f^{t_{n+m}}$  de acuerdo con el paso 1c.



**Figura 3.2:** Evolución temporal de la actualización de la malla de fluido.

### 3.8. General Purpose Finite Element Program (GPFEP)

GPFEP, es un sistema de generación de programas de elementos finitos, su implementación permite reducir el tiempo que tarda un programador experimentado en hacer que un programa corra consistentemente y sin error. Cabe resaltar que este sistema fue creado por el Departamento de Mecánica Computacional del Centro Atómico Bariloche (MECOM). El sistema GPFEP está compuesto por 5 programas:

- GPMESH: genera mallas aptas para GPFEP a partir de una malla base, la cual puede ser generada con Gmsh Mesh Generator, éstas deben estar compuestas por elementos del mismo tipo, es decir segmentos lineales, cuadráticos o cúbicos, triángulos lineales o cuadráticos, cuadriláteros bilineales o bicuadráticos, tetraedros lineales, cuboides lineales o cuadráticos.
- GPPER: calcula el ordenamiento óptimo de las incógnitas para optimizar el funcionamiento del resolutor lineal del sistema de ecuaciones. Lee las mallas y la cantidad de campos incógnitas y sus componentes, generando un archivo con la permutación (.per).



- GPBOCO: preprocesa las condiciones de contorno. Lee las mallas con las condiciones de contorno (.bcc) y genera un archivo con las condiciones de contorno en un formato adecuado para el resolutor (.bco). En ésta versión el programa sólo acepta condiciones de contorno de tipo Dirichlet.
- GPMAIN: es el resolutor (programa principal).
- GPPOS: postprocesa los resultados. Lee los archivos de salida de cada campo incógnita y genera nuevos archivos de acuerdo al post procesador especificado en el archivo de configuración (pargppos.cfg).

### 3.9. Programación computacional en paralelo

Toda la implementación de este algoritmo ha sido llevado a cabo en el sistema flexible PAR-GPFEP para generar elementos finitos de alto rendimiento software Buscaglia et al. (1999b,a), de tal manera de poder hacer uso de la programación en paralelo.

La malla del sólido, y por lo tanto todos los campos relacionados al sólido rígido, se calculan en todos los procesos, por ello se busca en la malla del sólido la información necesaria para la malla del fluido, esto puede llevarse a cabo independientemente en cada proceso, en forma paralela.

El sistema PAR-GPFEP provee medios de acceso a todos los campos desconocidos a nivel elemental (puntos de gauss), con el objetivo de construir matrices elementales en cada subpaso y gestionar la distribución de las mallas entre los diferentes procesos, por lo tanto cada proceso trata con una parte de la malla global, a la cual denominaremos malla local. La principal dificultad de este enfoque es el paso 1c, donde se necesita transferir información de una malla a la otra. Dependiendo de los desplazamientos de la malla es común que un valor requerido en un proceso necesite ser buscado en la malla asignada a otro proceso, esto genera una operación de comunicación.

En el afán de evitar interrupciones y minimizar la sobrecarga paralela, el paso de interpolación fue implementado como una operación colectiva involucrando los siguiente pasos:

1. Cada procesador tiene la posición de los nodos locales y busca la posición en la malla local, construyendo una lista de posiciones no encontradas en la malla local.
2. Esta lista de puntos no encontradas en cada proceso es transmitida todos los procesos (una operación colectiva de recolección total).
3. Cada procesador busca en la malla local las posiciones requeridas por otros procesos.
4. Los resultados de esta búsqueda son enviados a los procesos que lo requieran (en la práctica, debido al método de distribución de las mallas, con nodos y elementos

## **24 Resolución numérica de las ecuaciones de Navier Stokes con sólidos inmersos**

asignados a más de un proceso, se pueden encontrar puntos multiplicados, y este paso se convierte en una operación de reducción colectiva).

El sistema PAR-GPFEP también gestiona el ensamblaje paralelo de los sistemas globales derivados desde ambos problemas: el de Laplace y la ecuación de Navier Stokes, y su solución en paralelo.

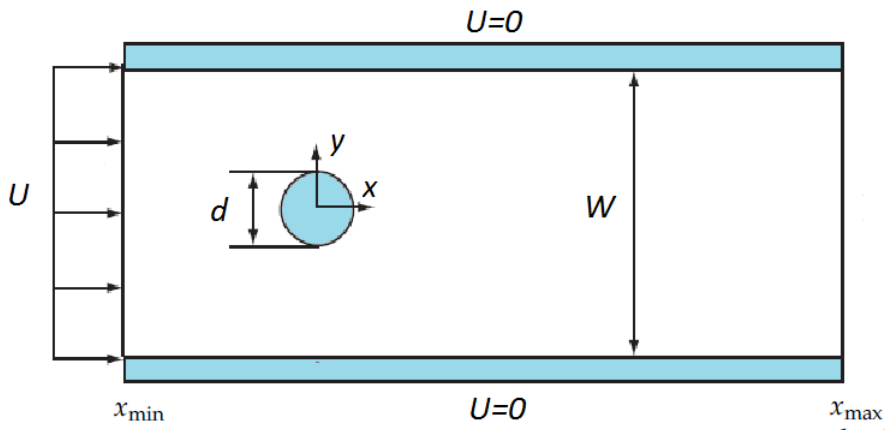
# Capítulo 4

## Validación del código

Para validar estas herramientas construidas en el grupo de trabajo, para el posterior estudio, introduciremos a continuación un ejemplo que también fue estudiado por distintas publicaciones como [1], [2], entre otras.

Se analizó el problema bidimensional de un sólido inmerso (en este caso un cilindro circular) en un fluido viscoso e incompresible. La geometría del problema se muestra en la Figura 4.1. Se fijó el diámetro del cilindro en  $d = 1\text{m}$  y se ubicaron las paredes del canal lo suficientemente lejos del obstáculo a fin de minimizar la acción de las mismas sobre el fluido en cercanías al cilindro, para ello se fijó el ancho del canal en  $W = 10d$ .

La ubicación del flujo de entrada se seleccionó para estar en  $x_{\min} = -5d$ , mientras que la ubicación del flujo de salida está en  $x_{\max} = 15d$ . Se fijó el centro de coordenadas en el centro del círculo.



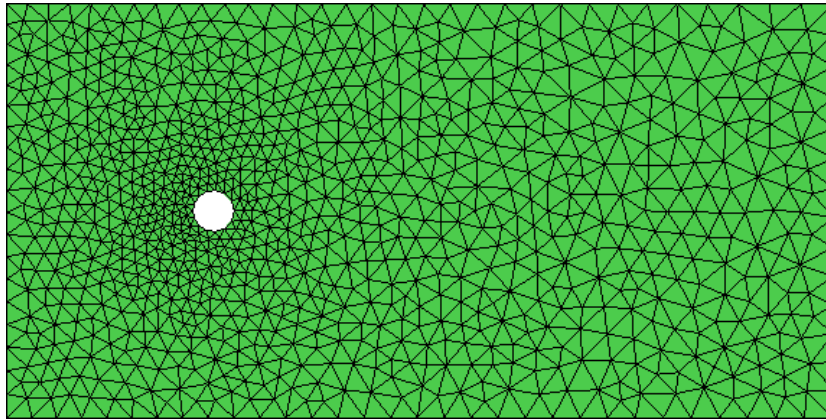
**Figura 4.1:** Dominio computacional para el flujo bidimensional pasando a través de un cilindro circular en un canal rectangular.

donde en la Figura 4.1 se denota por  $U$  a la velocidad del fluido y de las paredes.

#### 4.0.1. Discretización del dominio

Para reproducir la configuración de la Figura 4.1 se usó el programa Gmsh Mesh Generator, el cual genera la geometría y el mallado, dicho software por defecto genera mallas no estructuradas (triángulos).

En la Figura 4.2 se muestra un esquema de la geometría a simular, la cual se utilizará más adelante para validar el código, en este caso se usó una malla no simétrica de 1011 nodos y 1924 elementos a la que llamaremos malla no simétrica gruesa, esta malla es de tipo triángulos lineales, al igual que las precedentes.



**Figura 4.2:** Malla no simétrica del esquema a simular.

El sistema GPFEP utiliza un archivo de datos común para todos los sub-pasos ("gpfep.cfg" el cual contiene datos sobre los parametros materiales de la simulación como densidades, viscosidades, fuerzas externas actuantes, constantes restitutivas a modo de resorte impuestas sobre el sólido, coordenadas del centro de masa del sólido, ángulos del sólido, etc; parametros numéricos, tiempo de simulación, paso de tiempo de la simulación).

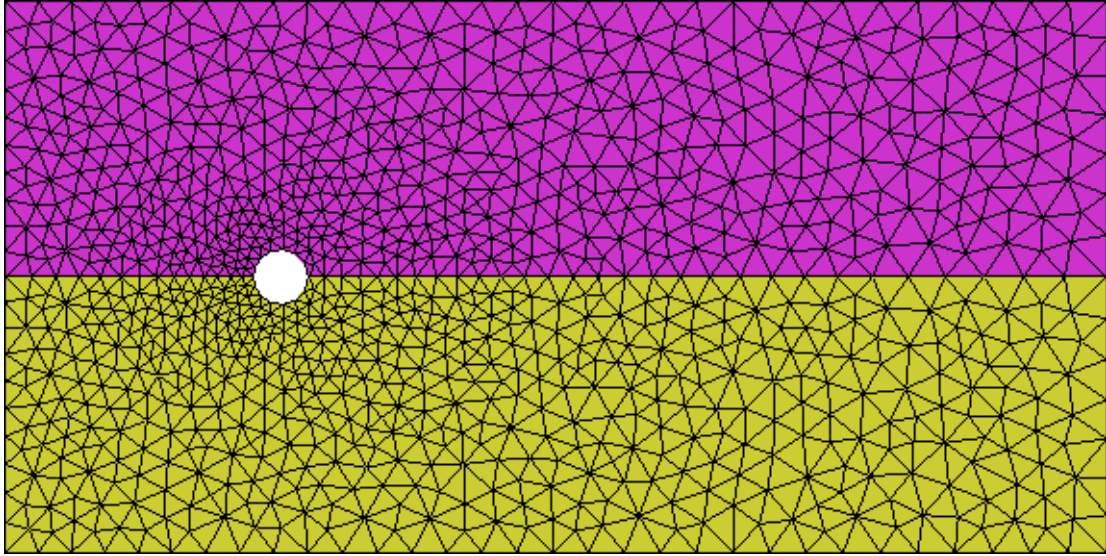
Con el objetivo de simular un flujo en el cual se puede observar el fenómeno de desprendimiento de los vórtices de Von Karman, se generarán mallas simétricas para una resolución más fiel del caso a analizar.

#### 4.0.2. Malla Simétrica

Las mallas simétricas tienen la ventaja de que cuando se trata de un problema simétrico como el del ejemplo a analizar, las magnitudes físicas se calculan con la misma precisión en las partes simétricas de la malla, evitando que se propaguen efectos oscilatorios como se verificará más adelante.

Para generar una malla simétrica, se realizó el mallado sólo de la mitad inferior del canal, luego para generar la mitad superior, se tomaron los nodos de la malla de la mitad inferior y se les invirtió el signo de la coordenada "y", esto asegura que en la

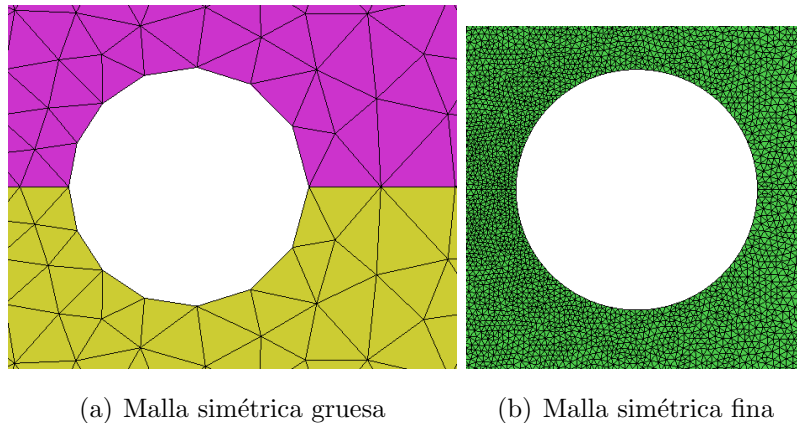
mallas superior se ubican los nodos en la misma coordenada "x" pero en la coordenada "y" opuesta, por último para crear los elementos de la malla superior, se tomaron los elementos de la malla inferior y se les intercambiaron las dos primeras columnas, esto se hace con el fin de conservar el sentido en que se leerán los nodos de cada elemento tanto en la malla inferior como en la superior. En la Figura 4.3, se puede observar el esquema con mallado simétrico grueso. En última instancia se usó el programa "enredo" para pegar las mallas inferior y superior.



**Figura 4.3:** Malla simétrica gruesa del arreglo a simular.

Esta malla simétrica contenía 1075 nodos y 2052 elementos, por lo que la denominaremos malla simétrica gruesa.

A continuación se hizo un mallado más fino tanto en la malla simétrica como en la no simétrica, se disminuyó la longitud característica de mallado en un orden de magnitud en todos los puntos, como se muestra en la Figura 4.4.



**Figura 4.4:** Comparación mallas simétricas, para longitudes características de mallado gruesas y finas.

Al disminuir el tamaño de la malla se obtuvieron: una malla simétrica de 96945 nodos y 192952 elementos en la malla de fluido, a la que llamaremos malla simétrica fina, y una malla no simétrica de 90227 nodos y 179512 elementos a la que llamaremos malla no simétrica fina.

### 4.0.3. Aplicación del código

La validación del resolutor se llevó a cabo mediante simulaciones bidimensionales de un flujo pasando a través de un cilindro circular de diámetro  $d$  y para varios números de Reynolds ( $Re = \rho \cdot U \cdot d / \mu$ ) correspondiente a los casos citados en la literatura resumida en la tabla 4.1 a la 4.5. El número de Strouhal  $St$ , el coeficiente de drag  $C_D$  y el coeficiente de lift  $C_L$  están definidos por:

$$C_D = \frac{F_d}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U \cdot d}, \quad C_L = \frac{F_l}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U \cdot d}, \quad St = \frac{f_\nu \cdot d}{U}, \quad (4.1)$$

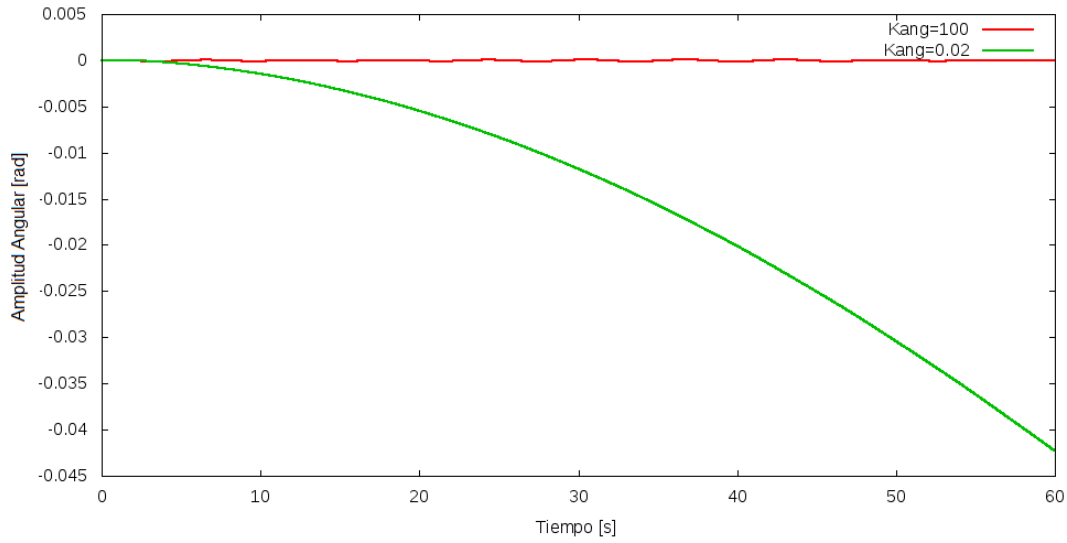
donde  $f_\nu$  es la frecuencia de desprendimiento de vórtices,  $F_d$  es la fuerza de arrastre por unidad de longitud,  $F_l$  es la fuerza de elevación por unidad de longitud.

El largo del canal es de  $20d$  y el ancho es  $10d$ , mientras que la longitud característica de mallado es de  $0.01d$  en las cercanías a la superficie del cilindro y en zonas lejanas a la superficie del cilindro se usó una longitud característica de mallado de  $0.08d$ , se usó una malla simétrica fina no estructurada como la mostrada en la sección anterior tanto para la generación de la malla del sólido como para la del fluido.

### 4.0.4. Cilindro 2D

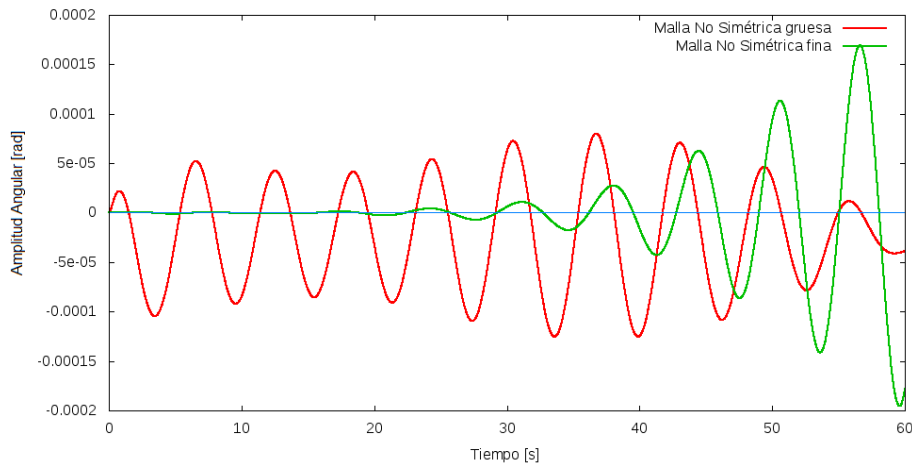
Se simuló la configuración que se muestra en la Figura 4.2 donde se usó una malla no simétrica gruesa como un avance preliminar, para ello se eligió dejar al sólido centrado en el origen de coordenadas (sin posibilidad de moverse en  $x$  e  $y$ ), dejando libre el grado de libertad de movimiento en la variable angular. En todos los casos que se muestran a continuación se despreciaron los efectos asociados a la gravedad debido a que este parámetro era irrelevante para la física del problema a analizar.

En el esquema mostrado en la Figura 4.5 se muestra la variación angular del sólido en función del tiempo al agregar una constante restitutiva angular. Se observa que la pendiente del caso con  $K_{ang} = 0,2$  es siempre negativa, lo cual se traduce en un torque resultante negativo, esto tiene que ver con la asimetría de la malla, ya que lo esperado sería que, si la amplitud angular oscila, que la misma sea de amplitud muy pequeña y entorno al valor cero, como se observa en la Figura 4.5 para el caso con  $K_{ang} = 100$ .



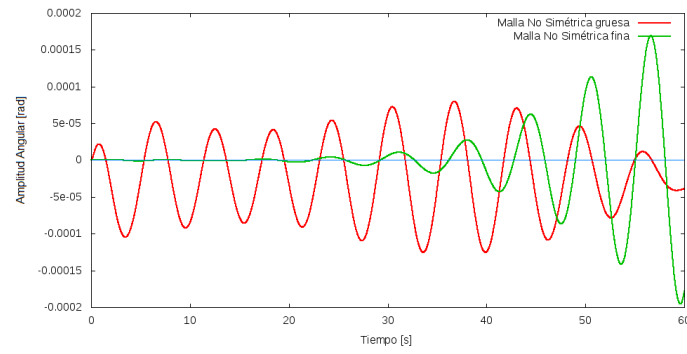
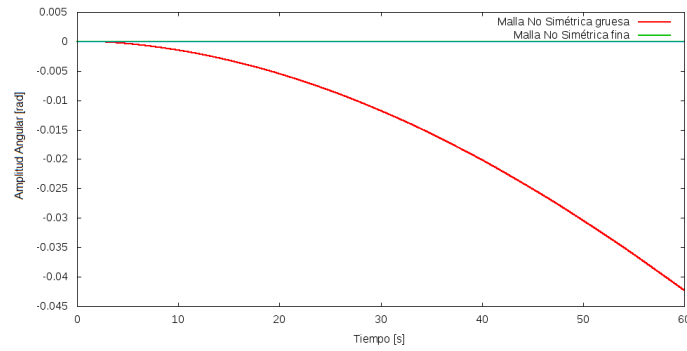
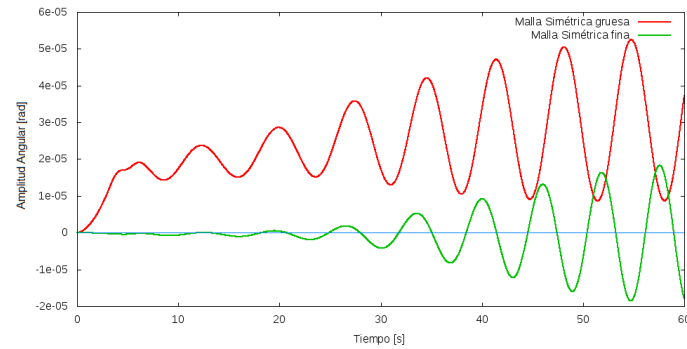
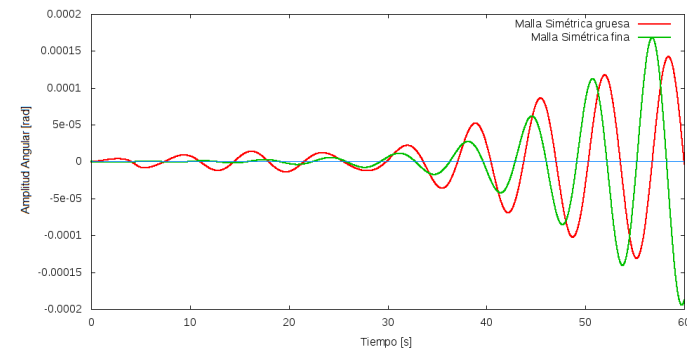
**Figura 4.5:** Malla no simétrica gruesa para  $Re=100$  para distintas constantes angulares.

En la Figura 4.6 se muestran los resultados obtenidos en una simulación empleando una malla simétrica y una malla no simétrica, ambas tienen la misma longitud característica de mallado, en este caso las dos mallas son gruesas. Se destaca que el desplazamiento angular que sufre el sólido con una malla simétrica es mucho menor que el de la malla no simétrica en los primeros 40 segundos, pero para tiempos mayores la amplitud de oscilación del caso simétrico aumenta respecto del caso no simétrico, para una  $K_{angular} = 100$ , sin embargo se observa que para tiempos mayores la oscilación queda acotada en una banda como se muestra en la Figura 4.8.



**Figura 4.6:** Comparación entre un mallado simétrico y un mallado no simétrico, donde ambas mallas son gruesas y se usó una  $K_{angular} = 100$  y un  $Re = 100$ .

Se comprobó que al disminuir la longitud de la malla tanto para la malla simétrica como para la malla no simétrica, la amplitud de la oscilación angular disminuyó un orden de magnitud aproximadamente, como se muestra en la Figura 4.7.

(a) Se usó  $K_{angular} = 0,02$ (b) Se usó  $K_{angular} = 100$ (c) Se usó  $K_{angular} = 0,02$ (d) Se usó  $K_{angular} = 100$ 

**Figura 4.7:** Comparación entre un mallado simétrico y un mallado no simétrico, para distintas longitudes características de mallado gruesas y finas, esta configuración es para  $Re = 100$ .



Por ello a partir de este momento para la validación del código se trabajó con la malla simétrica fina la cual tenía 96945 nodos y 192952 elementos, en la malla del fluido y 1798 nodos y 3466 elementos en la malla del sólido.

#### 4.0.5. Flujo 2D alrededor de un cilindro fijo en el espacio.

Se hicieron 5 simulaciones 2D para los números de Reynolds,  $Re = 30, 100, 185, 200, 300$ .

#### 4.0.6. Flujo estable: $Re = 30$

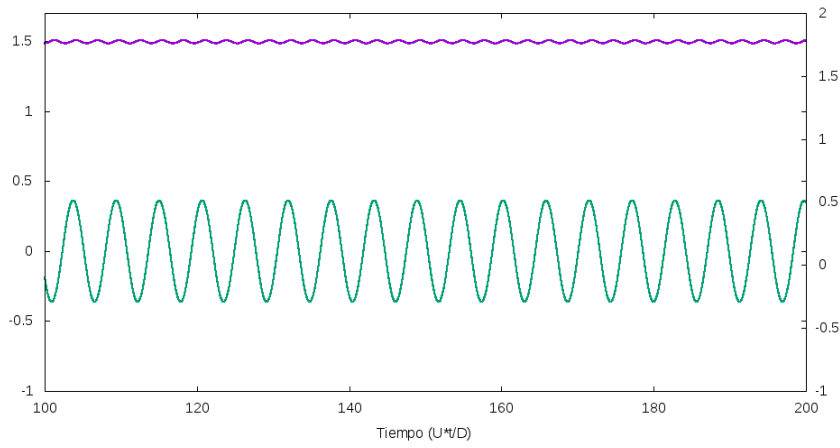
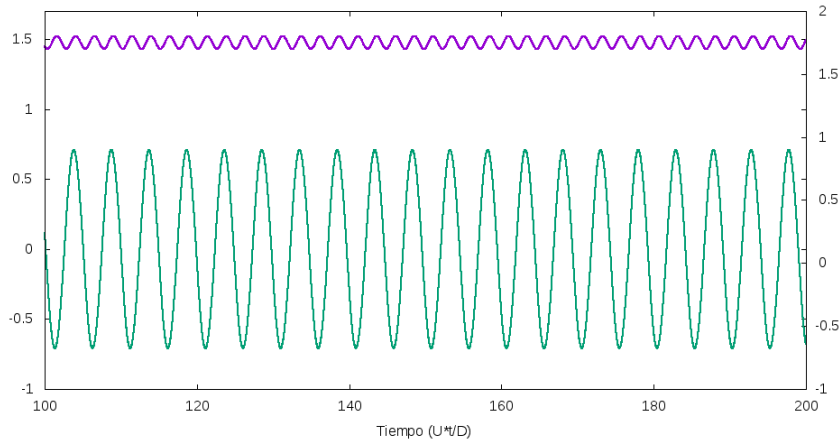
Este régimen es caracterizado por una región de recirculación estable justo detrás del cilindro. Todos los parámetros geométricos característicos definidos en la ecuación 4.1 se comparan con los datos de la literatura reportada en la tabla 4.1, con diferencias menores que 13.5% respecto del promedio de los valores de  $C_D$  para la malla más refinada.

	$C_D$	$St$
$Re = 30$	2.02	-
E. Constant and C. Li [1]	1.78	-
Pinelli et al. [3]	1.80	-
Blackburn and Henderson [2]	1.80	-
Tritton [4]	1.74	-

**Tabla 4.1:** Coeficientes para  $Re = 30$

#### 4.0.7. Flujo inestable: $Re = 100, 185$ .

Simulaciones en 2D en régimen inestable con desprendimiento de vórtices han sido computadas para  $Re = 100, 185$ , es decir, superior a  $Re = 40$  para la transición a la inestabilidad según Williamson [5] y Norberg [6]. Este régimen se llama “calle vórtice de von Karman puro”, y es caracterizado por el desprendimiento periódico de los vórtices, por convección y difundidos lejos del cilindro. La evolución temporal de  $C_D$  y  $C_L$  graficada en la Figura 4.8 y muestra que la amplitud en las fluctuaciones en el lift y el drag incrementan con el número de Reynolds, de acuerdo con el paper de Guilmineau y Queutey [7]. Para ambos números de Reynolds, el número de Strouhal, el drag medio (computado desde el tiempo adimensionalizado igual a 100 hasta 200), son comparados con la literatura resumida en las tablas 4.2 y 4.3.

(a)  $Re = 100$ (b)  $Re = 185$ 

**Figura 4.8:** Evolución temporal de los coeficientes de drag (color azul) y lift (color verde) para  $Re = 100, 185$ .

	$C_D$	$St$
$Re = 100$	1.49	0.175
E. Constant and C. Li [1]	1.37	0.165
Blackburn and Henderson [2]	1.35	-
Blarkley and Henderson [8]	-	0.165
Williamson [5]	-	0.164
Henderson [9]	1.35	0.165
Norberg [6]	-	0.164

**Tabla 4.2:** Coeficientes para  $Re = 100$

	$C_D$	$St$
$Re = 185$	1.476	0.2
E. Constant and C. Li [1]	1.379	0.198
Pinelli et al. [3]	1.509	0.199
Vanella and Balaras [10]	1.377	-
Guilminean and Queutey [10]	1.287	0.195
Lu and Dalton [11]	1.310	0.195
Williamson [5]	-	0.193

**Tabla 4.3:** Coeficientes para  $Re = 185$

#### 4.0.8. Para $Re = 200, 300$ .

Se comparó la simulación 2D predicha por el sistema GPFEP con la de la literatura perteneciente a una simulación 3D, como se muestra en las tablas 4.4 y 4.5.

	$C_D$	$St$
Simulación 2D: $Re = 200$	1.483	0.208
Simulaciones 3D		
E. Constant and C. Li [1]	1.384	0.1802
Rajani et al. [12]	1.338	0.1936
Qu et al. [13]	1.24	0.1801
Williamson [5] (exp.)	-	0.1800
Pinelli (Intern Communication)	1.371	0.1915

**Tabla 4.4:** Coeficientes para  $Re = 200$  en 2D y 3D.

	$C_D$	$St$
Simulación 2D: $Re = 300$	1.5323	0.2166
Simulaciones 3D		
E. Constant and C. Li [1]	1.43	0.198
Rajani et al. [12]	1.28	0.195
Mittal and Balachandar [14]	1.26	0.203
Williamson [5] (exp.)	-	0.203
Norberg [15] (exp.)	-	0.203
Wieselsberger [16] (exp.)	1.22	-

**Tabla 4.5:** Coeficientes para  $Re = 300$  en 2D y 3D.

Escencialmente hay 2 contribuciones al Drag sobre un objeto inmóvil inmerso en un flujo de fluido (o, a la inversa, un objeto que se mueve a través de un fluido estacionario):

1) Drag por fricción: debido a las tensiones de corte que actúan en la superficie del objeto como consecuencia de la viscosidad del fluido, es una función no sólo de la magnitud de la tensión de corte en la pared sino también de la orientación de la superficie sobre la que actúa. 2) Drag debido a la forma del objeto o Drag por diferencia de presión: debido a la separación de la capa límite como consecuencia del gradiente de presión en la dirección de flujo impuesta a la capa límite por el flujo no viscoso externo a la capa límite, esto significa que el desprendimiento de la capa límite provoca que la presión en la cara posterior del cilindro sea considerablemente menor que la presión en la cara frontal, entonces se desarrolla un Drag por diferencia de presiones a pesar de que  $\mu \rightarrow 0$ .

# Capítulo 5

## Simulación numérica de la clapeta

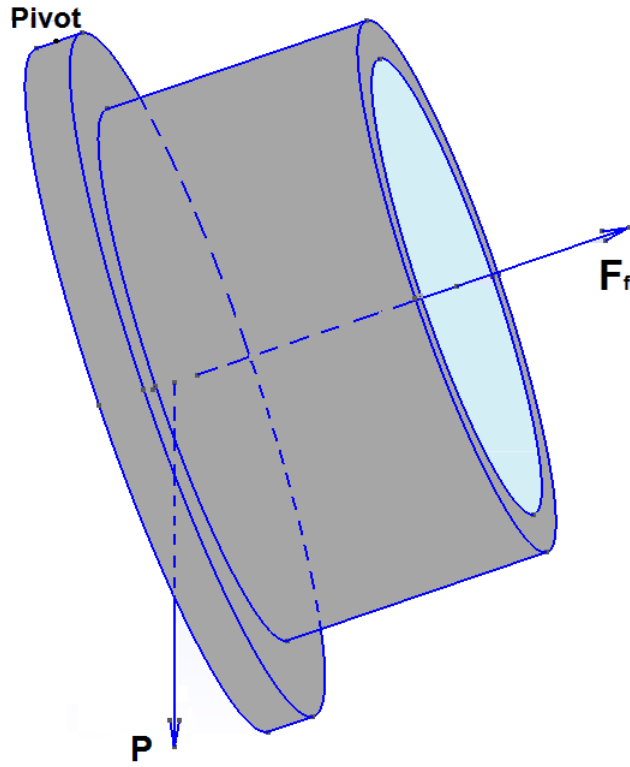
### 5.0.1. Modelado 2D

Sin pérdida de generalidad, en este trabajo se desarrollarán las bases teóricas del problema de apertura de una válvula de accionamiento pasivo del reactor en 2 dimensiones, como se mencionó anteriormente este reactor cuenta con 2 válvulas clapetas, sin embargo se modelará sólo una de ellas debido a la simetría que presenta el problema.

El cálculo que se muestra en las secciones precedentes es para homogeneizar el problema de 3 dimensiones y llevarlo a un problema de 2 dimensiones mediante la conservación de magnitudes físicas relevantes para el análisis.

### 5.0.2. Análisis del caso 3D

En la Figura [5.1](#) se muestra un esquema del sistema clapeta en 3 dimensiones, en el esquema se muestra una sólo válvula clapeta.



**Figura 5.1:** Sistema clapeta en 3 dimensiones, se muestra una sólo válvula clapeta.

donde  $\mathbf{P}$  es la fuerza peso de la clapeta y  $\mathbf{F}_{fl}$  es la fuerza que el fluido ejerce sobre la clapeta para mantenerla cerrada.

Las ecuaciones de equilibrio del sólido se presentan a continuación:

$$\tau_P + \tau_{fl} = 0 \quad (5.1)$$

$$\tau_P = -m_{3D} \cdot g \cdot \frac{D}{2} \cdot \sin(\theta - 270^\circ) \quad (5.2)$$

$$\tau_{fl} = \Delta p_{3D} \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot (h_1 + e + \frac{d}{2}) \quad (5.3)$$

donde  $\tau$  es torque que experimenta la clapeta y los subíndices fl y sl hacen referencia al toque que el fluido ejerce sobre la clapeta y al toque debido a su propio peso,  $D$ ,  $h_1$  y  $e$  son dimensiones que se muestran en la Figura 5.2.

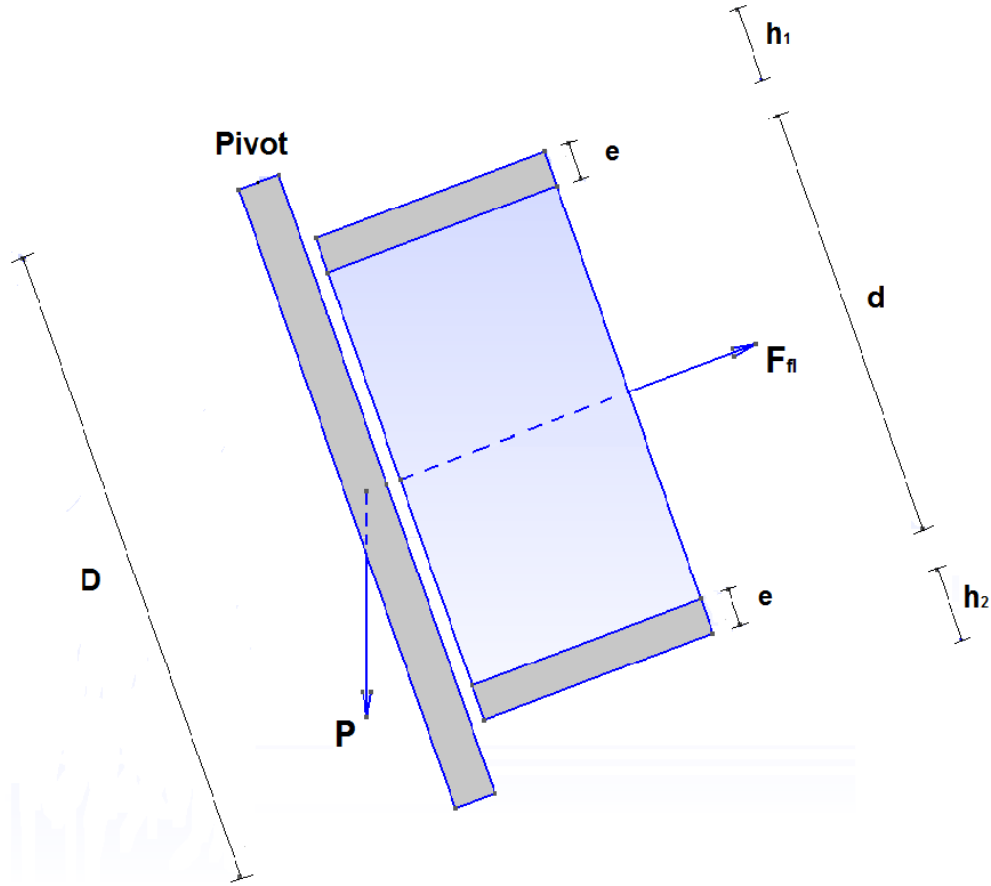
Al aplicar la condición de equilibrio, (ecuación 5.1):

$$\Delta p_{3D} = \frac{2 \cdot m_{3D} \cdot g}{\pi} \cdot \left[ \frac{D \cdot \sin(\theta - 270^\circ)}{d^2 \cdot (h_1 + e + \frac{d}{2})} \right] \quad (5.4)$$

ésta es la diferencia de presión mínima para mantener la clapeta cerrada.

### 5.0.3. Análisis del caso 2D

En la Figura 5.2 se muestra un esquema de la clapeta en 2 dimensiones.



**Figura 5.2:** Sistema clapeta en 2 dimensiones, se muestra una sólo válvula clapeta.

Las ecuaciones de equilibrio del sólido se presentan a continuación:

$$\tau_P + \tau_{fl} = 0 \quad (5.5)$$

$$\tau_P = -m_{2D} \cdot g \cdot \frac{D}{2} \cdot \sin(\theta - 270^\circ) \quad (5.6)$$

$$\tau_{fl} = \Delta p_{2D} \cdot (1m) \cdot d \cdot \left(h_1 + e + \frac{d}{2}\right) \quad (5.7)$$

Las ecuaciones de Navier Stokes a resolver en 2D o en 3D deben reflejar el mismo resultado, por ello:

$$p_{2D} = p_{3D} \quad \Rightarrow \quad \Delta p_{2D} = \Delta p_{3D} \quad (5.8)$$

Reemplazando las ecuaciones 5.8, 5.4, y aplicando la condición de equilibrio, se obtiene:

$$\boxed{m_{2D} = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{m_{3D}}{d} \cdot (1m)} \quad (5.9)$$

ésta será la masa que se asignará a la clapeta 2D para que la condición de apertura se verifique.

Al mismo tiempo se debe cumplir que las aceleraciones angulares de la clapeta en dos y tres dimensiones sean iguales, esto es:

$$\eta_{2D} = \eta_{3D} \quad \Rightarrow \quad \frac{\tau_{2D}}{I_{2D}} = \frac{\tau_{3D}}{I_{3D}}$$

$$\therefore \quad I_{2D} = \frac{\tau_{2D}}{\tau_{3D}} \cdot I_{3D}$$

Entonces, se obtiene:

$$\boxed{I_{2D} = \frac{4}{\pi} \cdot I_{3D} \cdot \frac{(1m)}{d}} \quad (5.10)$$

Se define  $\rho_{2D} = \frac{m_{2D}}{V_{2D}}$ , donde se tomó:  $V_{2D} = D \cdot e \cdot (1m)$

donde  $V_{2D}$  es el volumen de la clapeta en dos dimensiones.

$$\therefore \quad \boxed{\rho_{2D} = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{m_{3D}}{d \cdot D \cdot e}}$$

Al partir de la hipótesis que las presiones en 2D y 3D son iguales tanto en magnitud como en unidades, y como el caudal volumétrico no varía al cambiar de dimensiones, entonces se pueda asumir que  $\mathbf{A}_{pasa\text{je}\text{flujo}2D} = \mathbf{A}_{pasa\text{je}\text{flujo}3D}$ .

## 5.1. Aplicación: Clapeta 2D

Hasta el momento se usaron mallas no estructuradas, las mismas fueron generadas por el programa Gmsh Mesh Generator, a continuación se usó una malla estructurada para el sólido inmerso y para las regiones aledañas del fluido.

### 5.1.1. Generación de una malla estructurada para el sólido inmerso (la clapeta)

Una malla esencialmente divide al espacio en elementos o zonas sobre las cuales las ecuaciones a resolver pueden ser aproximadas, es decir que una malla es una representación discreta de la geometría que interviene en el problema. Las mallas pueden ser: estructuradas, no estructuradas o híbridas.



- **Malla estructurada:** es una celda que se repite a lo largo del arreglo, es decir que sigue un patrón uniforme y por lo tanto cada nodo tiene la misma cantidad de nodos vecinos. Este modelo suele presentar mejores condiciones de convergencia respecto de las mallas no estructuradas.
- **Malla no estructurada:** es una celda que no sigue un patrón uniforme a lo largo del arreglo. Puede ser más ineficiente desde el punto de vista espacial ya que requiere un almacenamiento explícito de los nodos vecinos celda a celda.

Como no hay patrón ordenado de acceso a memoria, es más difícil el aprovechamiento de la memoria cache y suele tener una ejecución más lenta del código respecto a las mallas estructuradas. Ofrecen más flexibilidad que las mallas estructuradas

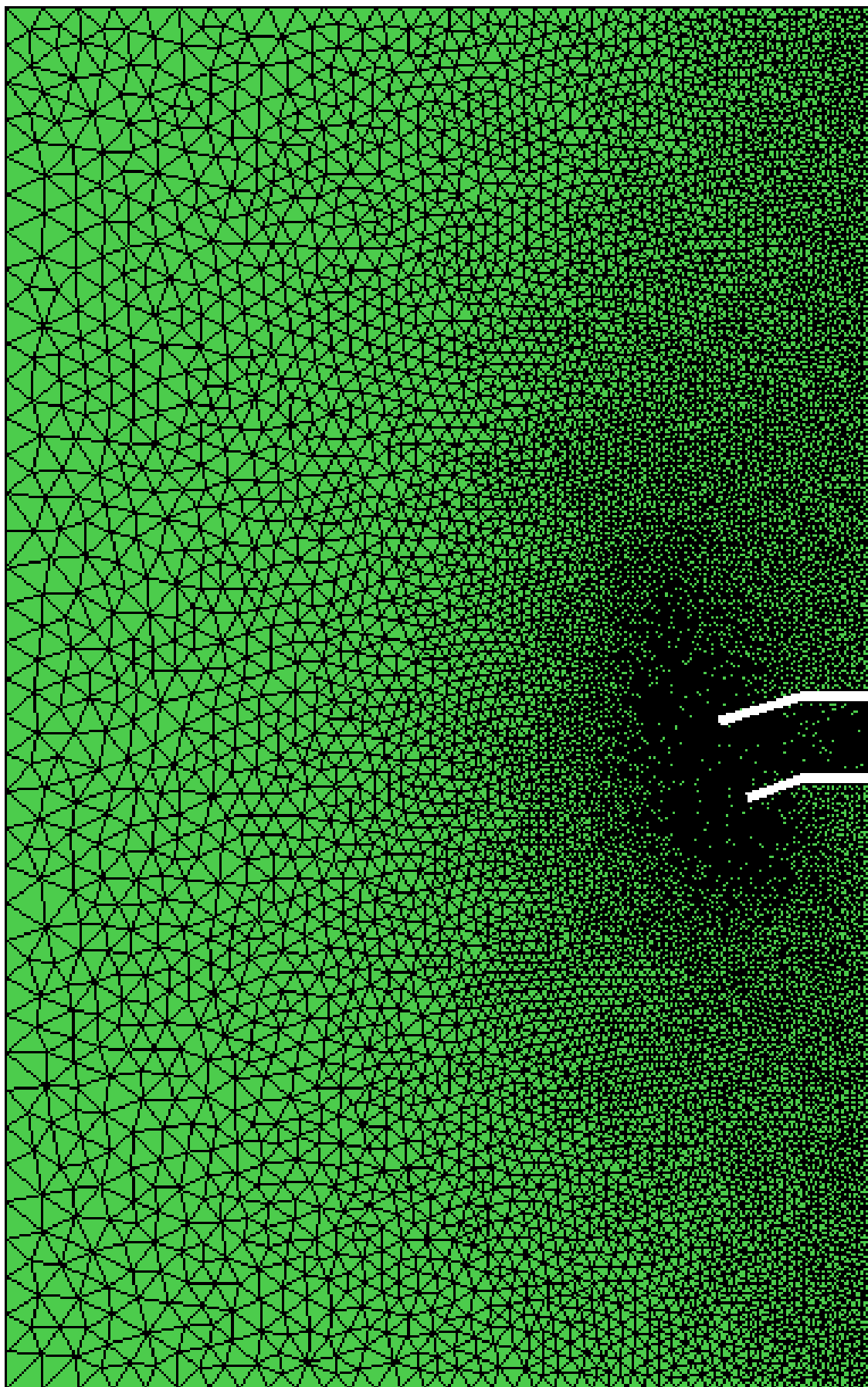
- **Mallas híbridas:** es una mezcla de mallas estructuradas con mallas no estructuradas, en las partes de la geometría que son regulares se usan mallas estructuradas, mientras que en las regiones mas complejas se usan mallas no estructuradas.

### 5.1.2. Elección del tipo de malla

- **Geometría compleja:** la generación de elementos a través de una malla no estructurada suele ser mucho más rápido que la generación de elementos a través de una malla estructurada.
- **Tiempo de CPU de la convergencia:** los cálculos con mallas estructuradas toman generalmente menos tiempo que un cálculo con mallas no estructuradas, ya que hasta la fecha, los algoritmos existentes son más eficientes.

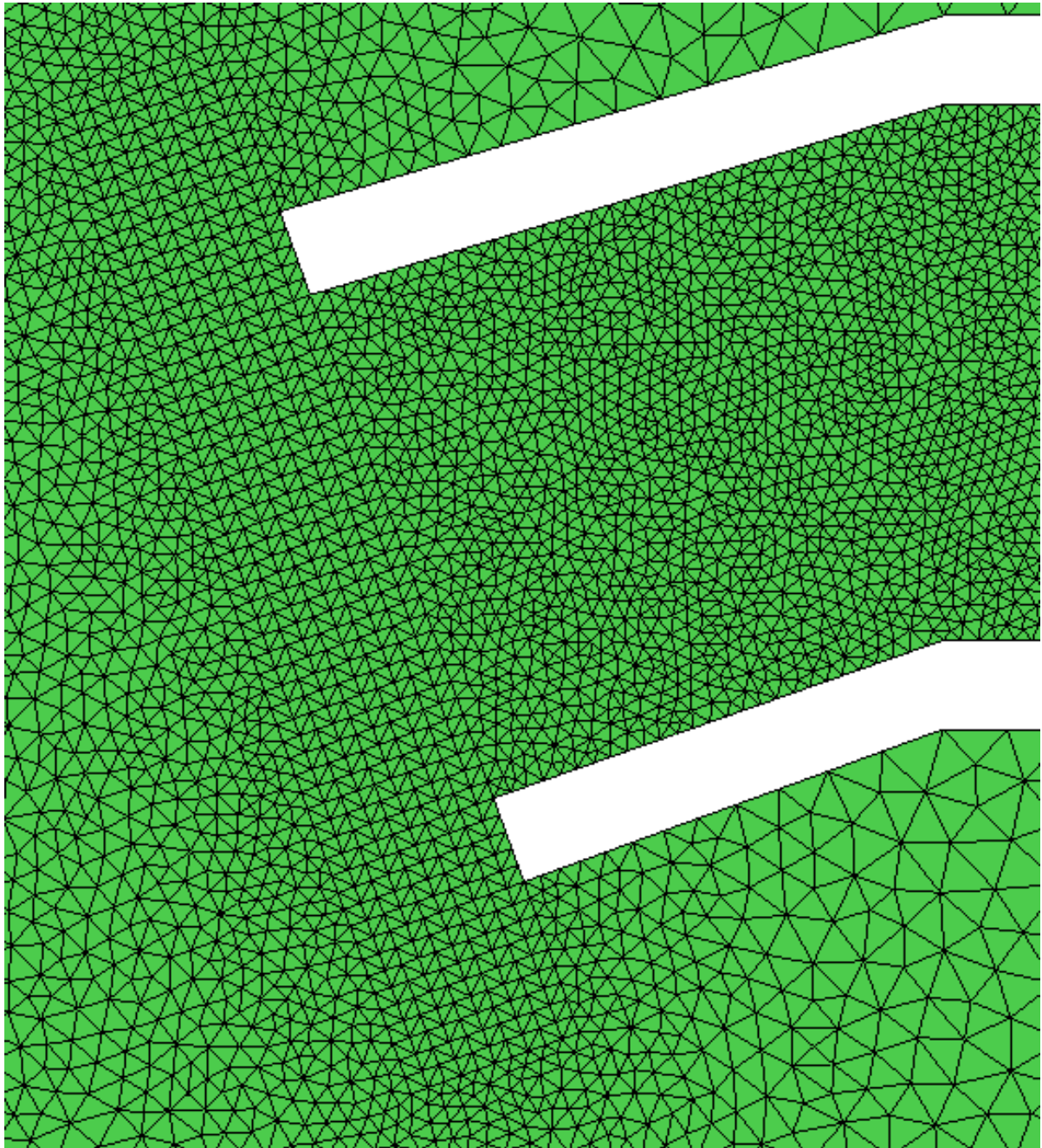
Se utilizó el programa “enredo” para la generación de una red de elementos finitos estructurada, este programa fué desarrollado por la División de Mecánica Computacional del Centro Atómico Bariloche y en su versión actual permite el fácil manejo de mallas 2D en practicamente cualquier geometría.

Se generó una malla estructurada correspondiente a la geometría de la clapeta y otra malla correspondiente al fluido que se encontraba en zonas cercanas al sólido rígido, mediante el uso del programa “enredo”, luego se procedió a unir la malla estructurada con la malla no estructurada generada por el programa “Gmsh Mesh Generator”, esta acción también se llevó a cabo con el programa “enredo”, la configuración empleada finalmente se muestra en la Figura 5.3.



**Figura 5.3:** Malla de la configuración empleada.

A continuación se presenta en la Figura 5.4 a la malla de fluido pegada, y pueden notarse las regiones con malla estructurada y no estructurada.



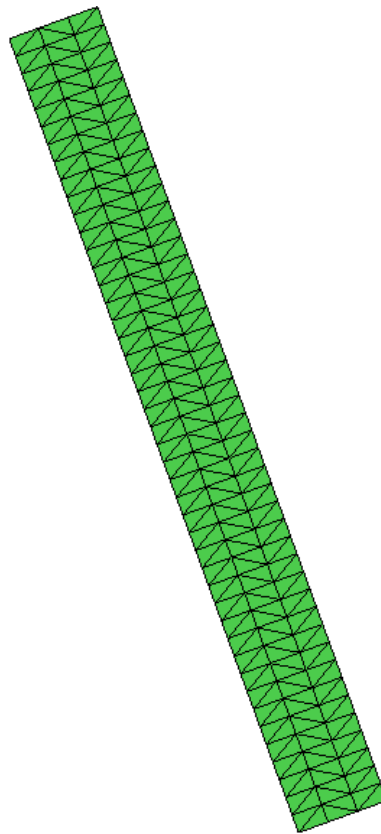
**Figura 5.4:** Zoom de la malla de fluido en zonas cercanas a la región de la clapeta.

Posteriormente se modeló el sólido rígido en 2D usando el programa enredo con el objetivo de obtener una malla estructurada de tipo TRI2 como se hizo anteriormente con el fluido en las zonas cercanas al sólido rígido, se tuvo especial cuidado de no dejar nodos sueltos, es decir nodos que no forman parte de ningún elemento y no se usan para nada. Es decir que se cumple con la ecuación:

$$2.NODT - NODB - 2 = ELEMENT \quad (5.11)$$

donde  $NODT$  representa el número de nodos totales en la malla,  $NODB$  representa el número de nodos en el borde de la malla y  $ELEMENT$  representa el número de elementos de la malla, esto se cumple tanto como para la malla de fluido como para la malla del sólido.

En la Figura 5.5 se puede observar el mallado del sólido rígido, donde para  $t = 0s$  se encuentra con una inclinación inicial de  $20^\circ$ .



**Figura 5.5:** Malla del sólido rígido .

En su versión actual el programa empleado permite calcular 6 campos, estos son:

1. Velocidad: 2 componentes.
2. Presión: 1 componente.
3. Función indicadora: 1 componente.
4. Desplazamiento de la malla: 2 componentes.

5. Velocidad de la malla: 2 componentes.
6. Fuerza de interacción fluido-sólido: 2 componentes.

## 5.2. Flujo Estacionario

Con el fin de simular el flujo por la tubería de salida del tanque del reactor RA-6 en condiciones nominales, es decir, en estado estacionario, se impusieron condiciones de contorno tanto de tipo Dirichlet como de tipo Neumann.

Para establecer las condiciones de Neumann resulta conveniente usar las facilidades de GPFEP para integración numérica que se programan en la rutina nssurf.F.

En la Figura 5.6 se muestran los grupos de elementos, en el script de las condiciones de contorno (.bcc) se establecieron condiciones de Dirichlet en los campos velocidad, desplazamiento de la malla y velocidad de la malla. A continuación se especifican las condiciones de contorno en el campo de velocidad:

- En los grupos de elementos: 14, 15, 16, 1, 2, 3, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12 se impuso en el campo 1, velocidad nula, es decir,  $\mathbf{v}_x = \mathbf{v}_y = 0$
- En el grupo de elementos 4 se impuso en el campo 1, condición de deslizamiento, esto es velocidad normal nula:  $\mathbf{v}_x = 0$   $\mathbf{v}_y$  libre  $\Rightarrow p = 0$
- En el grupo de elementos 13 se impuso en el campo 1:  $\mathbf{v}_x$  libre  $\mathbf{v}_y$  libre
- En todos los grupos de elementos (1 al 16) se impuso en los campos 4 y 5 que todas sus componentes fueran nulas, con el fin de que los nodos correspondientes a estos grupos de elementos se quedaran fijos.

Con el objetivo de simular la caída de presión en el núcleo se impuso una condición de Neumann en el campo 1, en la componente 1, en el grupo de elementos 13, es decir, se puso una fuerza de tracción en el límite derecho de la tubería. En 2 dimensiones, esto es:

$$\sigma_n \equiv \frac{dF_n}{dA} \quad dA = d.(1m) \quad \Rightarrow p \equiv -\frac{dF}{dn}$$

Esta ecuación surge de suponer que la componente desviadora del tensor de tensiones  $\sigma_{fD}$  es mucho mucho menor que la componente debida a la presión del fluido.

Ahora al aplicar la ecuación de Bernoulli estacionaria entre un punto del grupo 4 y un punto del grupo 13 (teniendo en cuenta las pérdidas de carga y que se trabaja con gravedad nula ya que la misma no influye en esta ecuación):

$$p_{g4} + \frac{1}{2}\rho v_{g4}^2 = p_{g13} + \frac{1}{2}\rho v_{g13}^2 + \Delta P_{lossload} \quad (5.12)$$

donde  $\Delta P_{lossload}$  es la pérdida de carga que experimenta el refrigerante entre la entrada y la salida del núcleo, y se adoptó según [17] la forma funcional:

$$\Delta P_{lossload}[mmH_2O] = \frac{(Q[\frac{m^3}{h}])^2}{289}$$

Donde la ecuación que se muestra arriba no es la medición de caudal en el núcleo estrictamente, sino que se modificó la correlación de [17] para poder describir la forma funcional de la pérdida carga en el núcleo para todo rango de caudal.

Si se toma como hipótesis que en el grupo de elementos 4:

$$v_{g4} \approx 0 \quad p_{g4} = p_{estancamiento} = 0$$

Mientras que en el grupo 13, se tomará como condición de presión dos términos, que hacen referencia a la presión dinámica y a la pérdida de carga del fluido que se encontraría pasando por una tubería adyacente al grupo 13 (a la derecha), esta región del espacio no se simuló en este trabajo pero se la consideró como condición de contorno en presión.

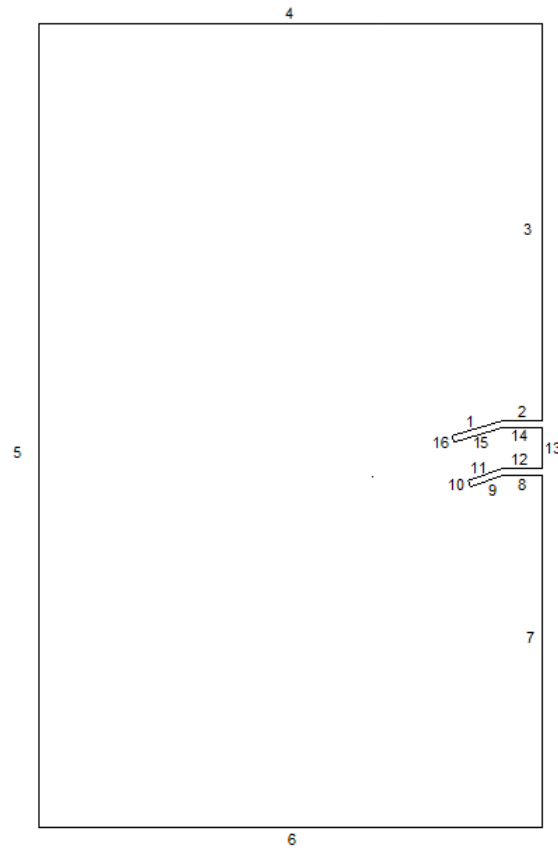
A este fluido virtual le asignaremos la velocidad del refrigerante en condiciones nominales para simular el caso estacionario, lo cual equivale a  $5\frac{m}{s}$ , mientras que para el caso transitorio se considerará su variación temporal.

$$\therefore \quad p_{g13} = -(\frac{1}{2}\rho v_{flvirtual}^2 + \Delta P_{lossload})$$

Entonces la rutina "nssurf.F" recibe como parámetro de entrada:

$$\frac{\partial F}{\partial n} = \frac{1}{2}\rho v_{flvirtual}^2 + \Delta P_{lossload}$$

donde en estado estacionario:  $\frac{1}{2}\rho v_{flvirtual}^2 = 12402,5Pa$ ,  $\Delta P_{lossload} = 3889,42Pa$

**Figura 5.6:** Malla de superficie del fluido.

Se establecieron los siguientes valores relevantes para la simulación:

$Re = 1185,17$	
$\rho_f$	$992,2 \frac{kg}{m^3}$
$\mu_f$	$0,653 \frac{kg}{m.s}$
$\rho_{s2D}$	$4024,55 \frac{kg}{m^3}$
$\mu_s$	$1 \frac{kg}{m.s}$
$\theta_o$	$5,061454831 rad$
Diámetro tubería	0.156 m
Diámetro Clapeta	0.234 m
$h_1$	0.0156 m
$h_2$	0.0104 m
Espesor tubería	0.026 m
Espesor Clapeta	0.0156 m
$m_{sl2D}$	14.6912 kg
$I_{2D}$	$0.2686 kg.m^2$

**Tabla 5.1:** Datos de las variables físicas a implementar en la simulación.

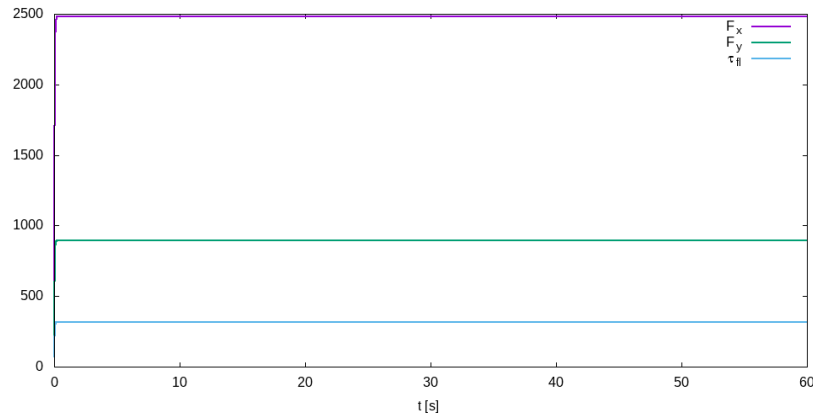
donde el número de Reynolds fue calculado en estado estacionario en el límite inferior de la tubería de salida del reactor RA-6.

En estos cálculos preliminares no se ha utilizando ningún modelo de turbulencia, para evitar resolver las capas límites más finas que llevarían a una cantidad excesiva de nodos, por ello se utilizó una viscosidad artificialmente alta.

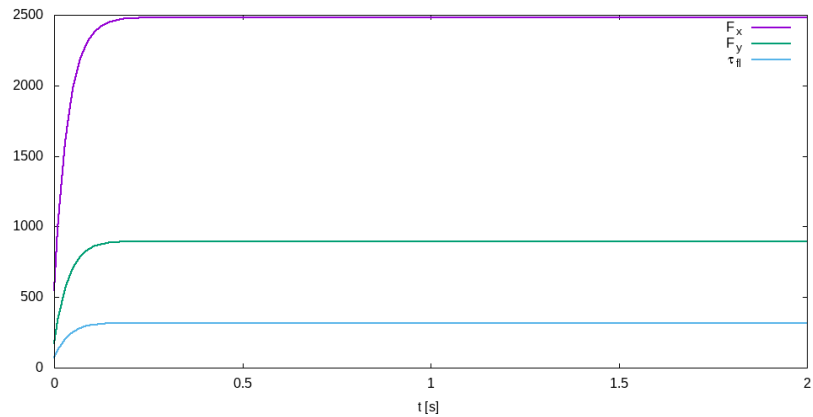
La presión de referencia establecida en el dominio computacional es  $p_{ref} = 0$ , si bien la presión juega un rol importante en la ecuación de Navier Stokes, en la misma se implementa su gradiente, es decir que sólo importa su variación en el espacio, en este caso es más bien un multiplicador de Lagrange que se usa para el cierre de las ecuaciones.

En esta etapa se estableció que el sólido tendría la libertad de moverse desde  $t = 0s$ , sin embargo el mismo no varió su posición inicial en toda la simulación estacionaria.

En la Figura 5.7 se muestran la fuerza y el torque que el fluido ejerce sobre la clapeta.



(a)

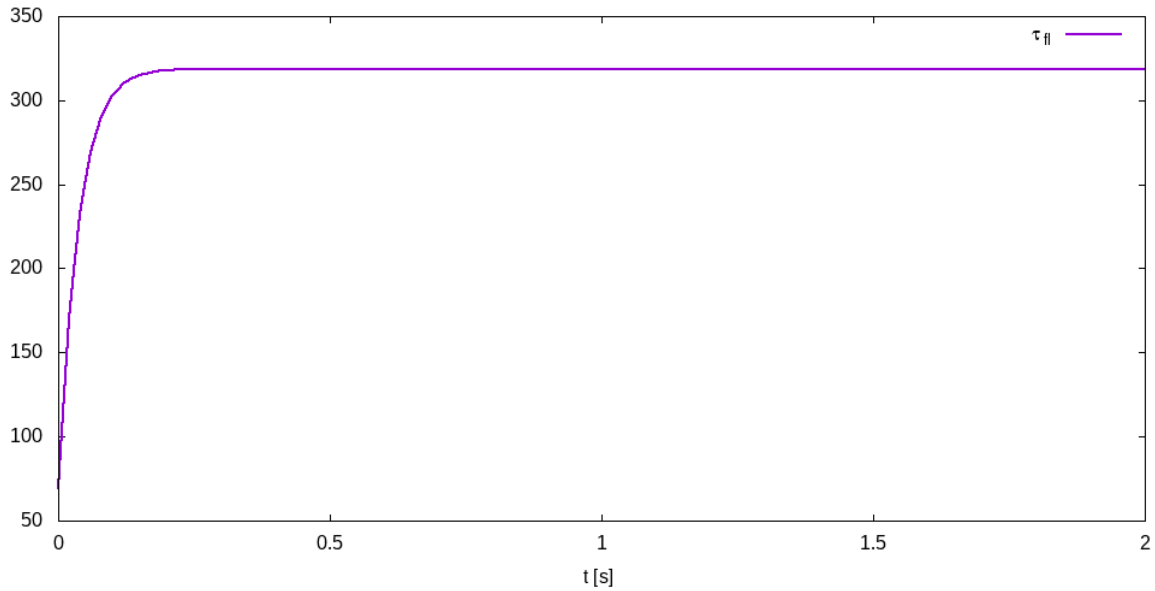


(b)

**Figura 5.7:** Fuerza y torque sobre la clapeta.



En la Figura 5.8 se muestra la evolución de la fuerza y el torque en los primeros y en los últimos segundos. Se puede observar en ésta figura que las curvas siempre son positivas para todo tiempo de simulación.



**Figura 5.8:** Torque que el fluido ejerce sobre la clapeta en los primeros segundos.

Se verificó que en el modo de operación normal, la válvula clapeta se mantiene cerrada, esto es, la fuerza que el fluido ejerce sobre la clapeta en la dirección  $x$  es positiva, al igual que en la dirección  $y$ , el torque debido al fluido es positivo y mayor en magnitud que el torque debido al peso de la clapeta, como se muestra en la tabla 5.2.

Al promediar los valores desde  $t = 30$  s hasta 60 s se obtiene:

$F_x$	2479,73N
$F_y$	895,172N
$\tau_{fl}$	318,711N.m
$\tau_P$	5,7613N.m

**Tabla 5.2:** Fuerzas y torques sobre la clapeta en operación normal

Se verificó que el fluido que se encuentra a la izquierda de la clapeta se encontraba prácticamente en reposo y no había un cambio significativo en la presión

## 5.3. Flujo Transitorio

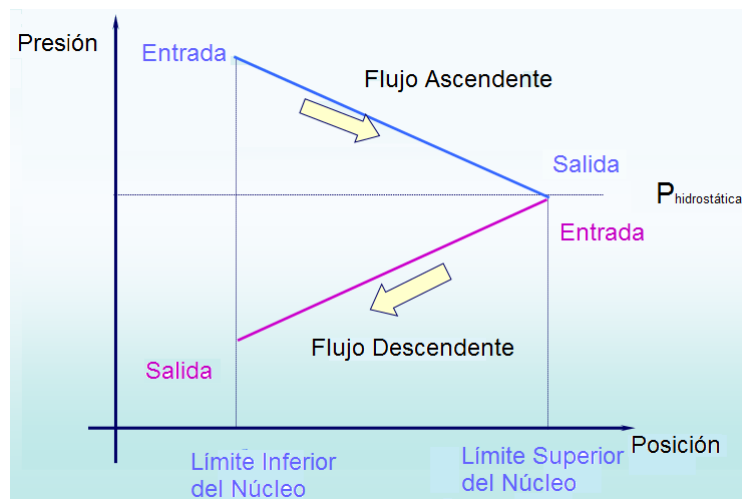
### 5.3.1. Transitorio: Pérdida del caudal del circuito de refrigeración primario.

Es de vital importancia para el licenciamiento y operación de un reactor nuclear hacer un Análisis Determinista de Seguridad, para ello es necesario realizar un Modelado y análisis de eventos de pérdida del caudal (LOFA).

### 5.3.2. Circulación Forzada: Ascendente vs Descendente

El límite para la potencia de un reactor experimental está dado por la Presión, ya que al aumentar la potencia, debemos aumentar el caudal ya que debemos remover más energía debido a las fisiones del  $U^{235}$ , esto implica una mayor pérdida de carga en el núcleo ( $\Delta P_{lossload}$ ), finalmente esto podría hacer que el refrigerante llegue a saturación.

La Figura 5.9 muestra como varía la Presión en función de la posición cuando el fluido ingresa por el núcleo para un reactor con flujo ascendente<sup>2</sup> y otro con flujo descendente.



**Figura 5.9:** Presión en función de la posición para reactores con caudal ascendente y descendente por el núcleo.

<sup>2</sup>El reactor argentino RA-10, actualmente en construcción, será de flujo ascendente, contará con una chimenea la cual en operación normal impone un caudal de cierre (descendente), mientras que en convección natural el caudal por esta chimenea será ascendente. Además el diseño de las clapetas es distinto al del reactor RA-6.

## 5.4. LOFA

### 5.4.1. Eventos iniciantes contribuyentes:

1. Falla del motor de la bomba: Actúa el volante de inercia (detención de todas las bombas).
2. Rotura o traba del eje de la bomba: No actúa el volante de inercia.
3. Rotura en el primario que lleva a la pérdida del caudal: Se analiza con las secuencias de LOCA.
4. Reducción de caudal debido a un by pass en el núcleo: apertura espuria de clapeta.
5. Bloqueo de canales refrigerantes.

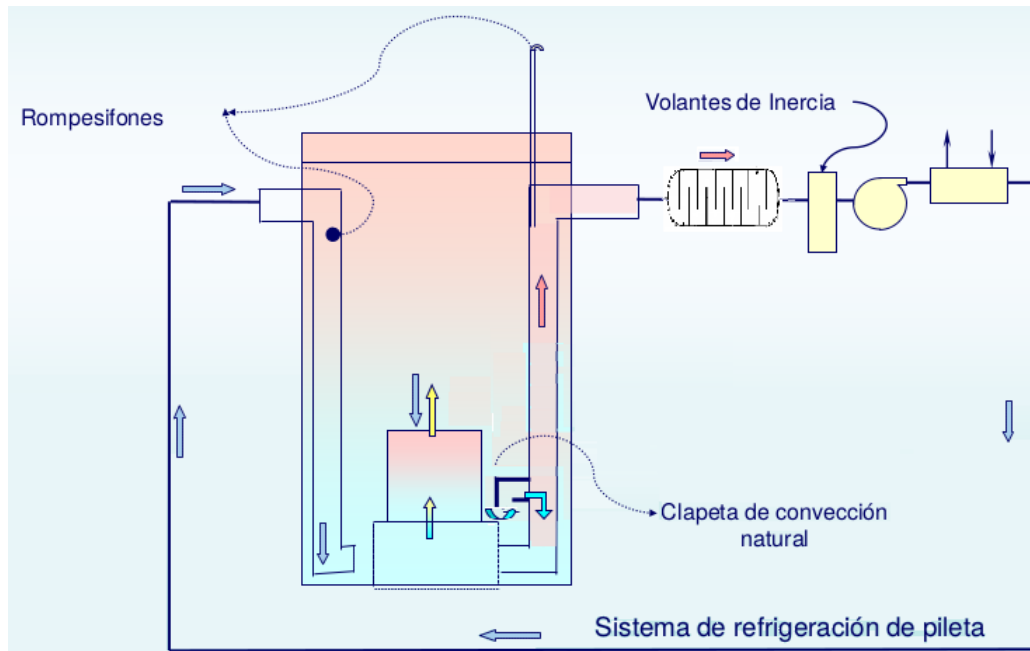
En este trabajo sólo se analizará el apartado 1 de los eventos iniciantes que contrubuyen al **LOFA**.

El criterio de **Defensa en Profundidad** prevé que ante el evento de parada de bomba del primario se produzca el Disparo de SCRAM por: baja caída de Presión en el núcleo, bajo caudal en el primario, alta temperatura de salida del núcleo. Actuación del Volante de inercia, clapetas de circulación natural.

### 5.4.2. Parada de bomba del primario

Características generales: Caída abrupta del caudal, consecuencia más severa: reducción del flujo crítico de calor. Se conserva el inventario de refrigerante.

1. Corto plazo: se requiere evitar  $DNBR < 1$ :
  - Extinción rápida del reactor.
  - Proveer inercia a la bomba para extender la circulación forzada hasta que se extinga el reactor, decaiga la potencia y la circulación natural sea suficiente para remover dicha potencia.
2. Mediano plazo: transición a circulación natural: apertura de clapetas, cambio de la circulación del circuito primario a la pileta como se muestra en la Figura 5.10.



**Figura 5.10:** Esquema del reactor RA-6 en su transición de convección forzada a convección natural.

3. Largo plazo: establecimiento de la circulación natural (pseudo-estacionario) y acumulación de potencia de decaimiento en piletas (sumidero de calor).

## 5.5. Modelado del transitorio.

A continuación se procederá a explicar las bases teóricas utilizadas para modelar el fenómeno de coastdown de la bomba del primario, el cual consiste en simular la pérdida de la bomba del primario. Esto se traduce en una disminución del caudal en el tiempo, desde condiciones nominales hasta que llega a cero, si no actúan los sistemas de seguridad del reactor RA-6.

### 5.5.1. Cálculo de la velocidad del refrigerante.

*Desde  $t = t_{LOFA}$  hasta la apertura de la clapeta:*

En un sistema inercial se define la energía cinética como:

$$E_c = \frac{1}{2} \cdot I \cdot \omega^2 \quad (5.13)$$

donde  $I$  es el momento de inercia del volante de inercia que se encuentra solidario al

eje de la bomba del primario, y  $\omega$  es la velocidad angular con que giran los álabes de la bomba del primario.

Expresando la potencia de frenado ( $Pot_f$ ) como:

$$Pot_f = -\frac{dE_c}{dt} = -I.\omega.\frac{d\omega}{dt} \quad (5.14)$$

Se define el número adimensional  $\nu$  como:

$$\nu = \frac{\omega}{\omega_o} \Rightarrow Pot_f = -I.\omega_o^2.\nu.\frac{d\nu}{dt} \quad (5.15)$$

La potencia de frenado puede expresarse como la suma de la potencia hidráulica ( $Pot_h$ ) y la mecánica debida al rozamiento ( $Pot_m$ ):

$$Pot_f = Pot_h + Pot_m \quad (5.16)$$

*Potencia hidráulica:*

$$Pot_h = H.Q.\rho.g \quad (5.17)$$

donde H es la altura de la bomba de la bomba para todo tiempo t, Q es el caudal volumétrico para todo tiempo t,  $\rho$  es la densidad del fluido, g es la aceleración de la gravedad.

Usando el Teorema Pi de Buckingham [18] y la ley de similitud de bombas:

$$\frac{Q}{Q_o} = \frac{\omega}{\omega_o} = \nu \quad \Rightarrow \quad Q = Q_o.\nu \quad (5.18)$$

$$\frac{H}{H_o} = \left(\frac{\omega}{\omega_o}\right)^2 = \nu^2 \quad \Rightarrow \quad H = H_o.\nu^2 \quad (5.19)$$

Reemplazando 5.18 y 5.19 en 5.17:

$$Pot_h = H_o.\nu^2.Q_o.\nu.\rho.g = H_o.Q_o.\nu^3.\rho.g \quad (5.20)$$

**En Operación Normal:**

$$\eta = \frac{\text{Potencia hidraulica}}{\text{Potencia de eje}} = \frac{\Delta P_{Bomba} \cdot Q_o}{M_o \cdot \omega_o}$$

$$\Delta P_{Bomba} = \rho \cdot g \cdot H_o$$

$\therefore$

$$\boxed{M_o = \frac{\rho \cdot g \cdot H_o \cdot Q_o}{\omega_o \cdot \eta}} \quad (5.21)$$

Reemplazando 5.21 en 5.20 se obtiene:

$$Pot_h = M_o \cdot \omega_o \cdot \nu^3 \quad (5.22)$$

*Potencia mecánica:*

$$Pot_m = M_m \cdot \omega \quad (5.23)$$

donde  $M_m$  es el momento mecánico debido al rozamiento.

Se define el número adimensional  $m_f$  como:

$$m_f = \frac{M_m}{M_o} \quad \Rightarrow \quad M_m = M_o \cdot m_f \quad (5.24)$$

$$\nu = \frac{\omega}{\omega_o} \quad \Rightarrow \quad \omega = \omega_o \cdot \nu \quad (5.25)$$

Reemplazando 5.24 y 5.25 en 5.23 se obtiene:

$$Pot_m = M_o \cdot m_f \cdot \omega_o \cdot \nu \quad (5.26)$$

Se define  $T_p$  como:  $T_p = \frac{I \cdot \omega_o}{M_o}$ .

Reemplazando las ecuaciones 5.15, 5.22, 5.26 en la ecuación 5.16, se obtiene la siguiente ecuación integral:

$$\boxed{\int_{t_{LOFA}}^t dt = -T_p \int_1^\nu \frac{d\nu}{\nu^2 + m_f}} \quad (5.27)$$

Se observa que en el lado derecho de la ecuación 5.27 hay dos variables dependientes, es decir,  $m_f$  depende de  $\nu$ .

Para caudales bajos se puede inferir que el término  $m_f$  es muy pequeño respecto a  $\nu^2$ , por ello se tomó como hipótesis simplificativa despreciar  $m_f$  frente a  $\nu^2$ , con lo que la solución de la ecuación 5.27 queda expresada de la siguiente manera:

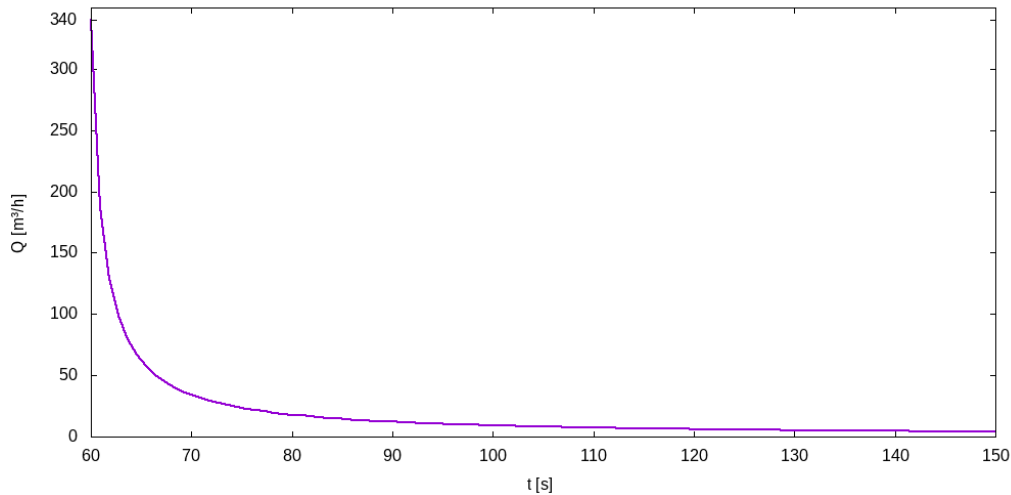
$$Q = \frac{Q_o}{1 + \frac{(t-t_{LOFA})}{T_p}} \quad (5.28)$$

En la tabla 5.3 se especifican los valores empleados en la simulación del coastdown de la bomba del primario:

$\eta$	1
$H_o$	48m
$\omega_{oPP}$	156,032 $\frac{rad}{s}$
$M_o$	282,506 N.m
$T_p$	1,1046s

**Tabla 5.3:** Datos empleados para la simulación del coastdown de la bomba del primario.

En la Figura 5.11 se presenta una comparación entre las funciones que describen la caída de caudal a lo largo del tiempo y una medición en el switch de la bomba del primario. Del desarrollo teórico mencionado con antelación se puede observar en al despreciar el rozamiento ( $m_f$ ), el caudal disminuye más lentamente que en el caso con rozamiento, esto es porque hay menos energía cinética que se pierde como rozamiento en la bomba.

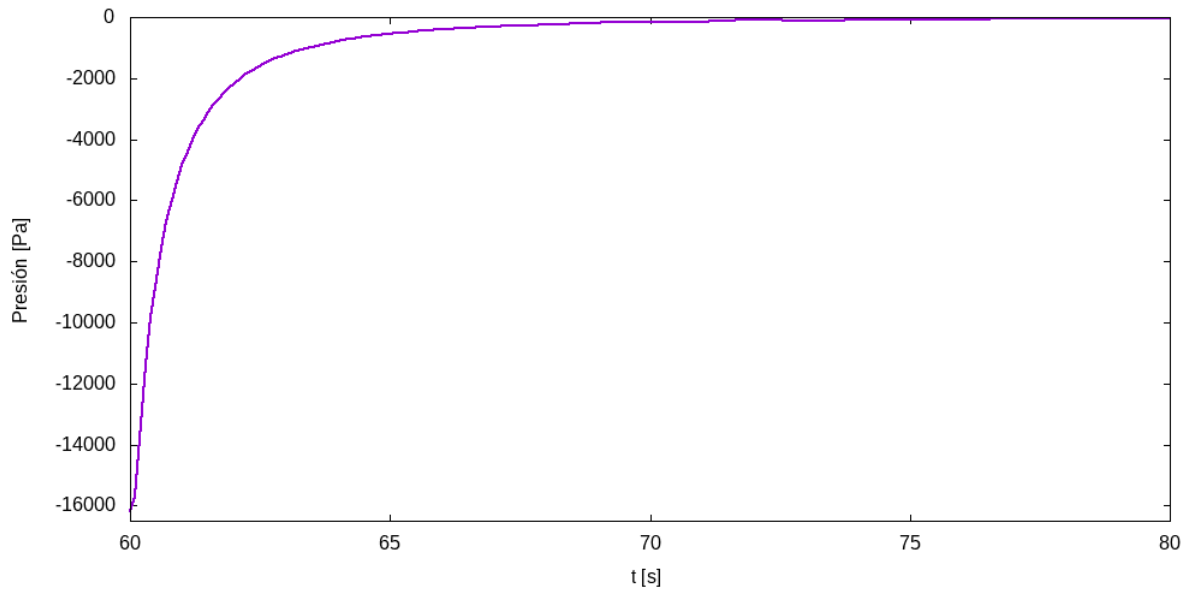


**Figura 5.11:** Caudales para los modelos con y sin rozamiento.

En este contexto se simulará el coastdown de la bomba del primario, lo cual se

traduce en una disminución de presión en la condición de borde del grupo de elementos 13 que se estableció como condición de Neumann en la Fuerza en la rutina "nssurf.F".

En ésta etapa se establecerá  $t_{LOFA} = 60s$ . Posteriormente se comienza con la simulación del coastdown de la bomba. La Figura 5.12 muestra la evolución temporal del campo de presión en un punto que se encuentra dentro la cavidad (en la zona central).

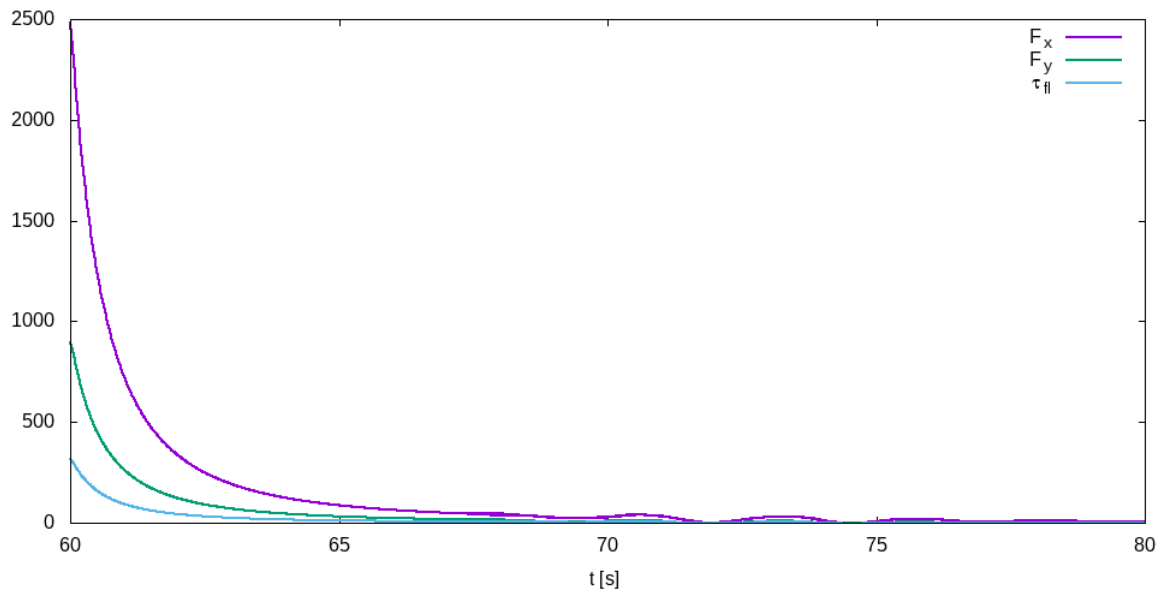


**Figura 5.12:** Evolución temporal de la presión en un punto dentro de la cavidad

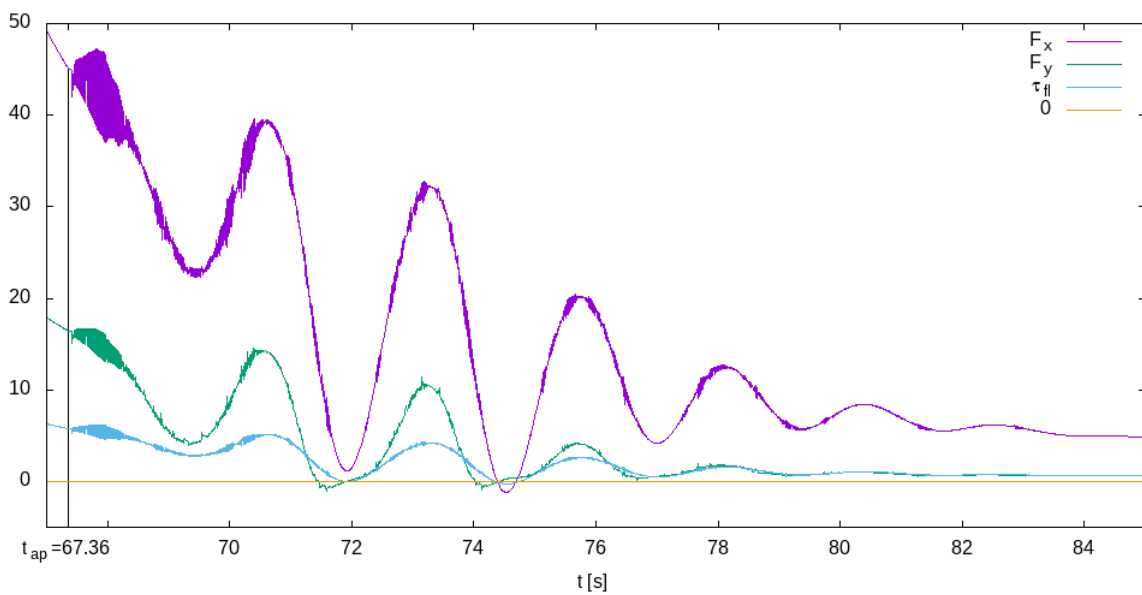
De un análisis hidrodinámico se puede inferir que las fuerzas y torques calculadas en la clapeta disminuirán a medida que transcurre el tiempo debido a que la presión es monótonamente decreciente en el tiempo, esto se ve reflejado en la Figura 5.12.

En la Figura 5.13 se muestran las variables físicas resultado de la interacción fluido-estructura mientras avanza el fenómeno de coastdown de la bomba del primario.





(a) Fuerzas y torque.



(b) Tiempo de apertura de la clapeta.

**Figura 5.13:** Evolución temporal de las fuerzas y el torque durante el transitorio.

A partir de los resultados obtenidos se puede concluir que el tiempo de apertura de la válvula clapeta es de 7.4 s y tarda alrededor de 50 s en alcanzar la posición vertical.

Para el cálculo del desplazamiento angular en el sólido, se utilizó la siguiente lógica con el fin de evitar que la clapeta se pasara de su límite de ángulo máximo de cierre que en este caso es  $20^\circ$  respecto de la vertical.

```

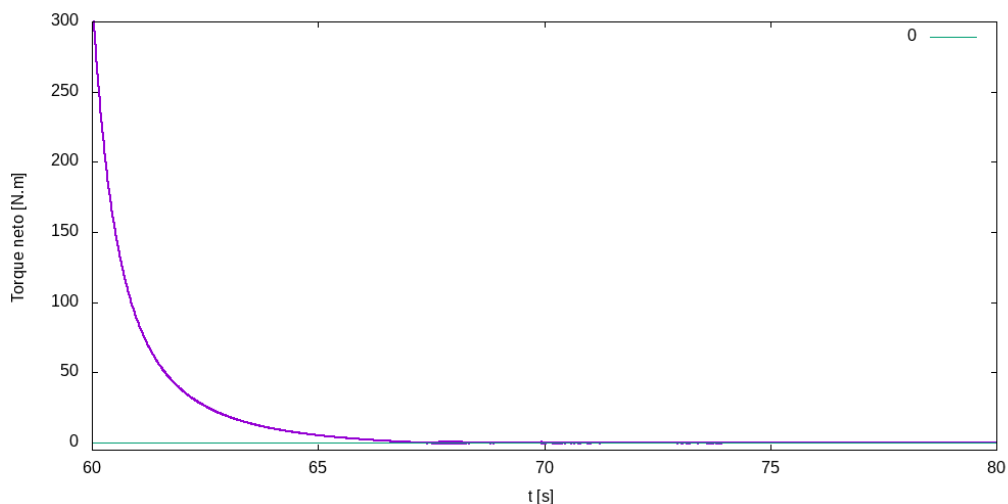
angle_initial = 5.061454831
if( (thcmz+dthz) .gt. angle_initial ) then
    dthz = angle_initial - thcmz
    dwcmz = -wcmz
end if

```

**Figura 5.14:** Lógica para el movimiento del sólido.

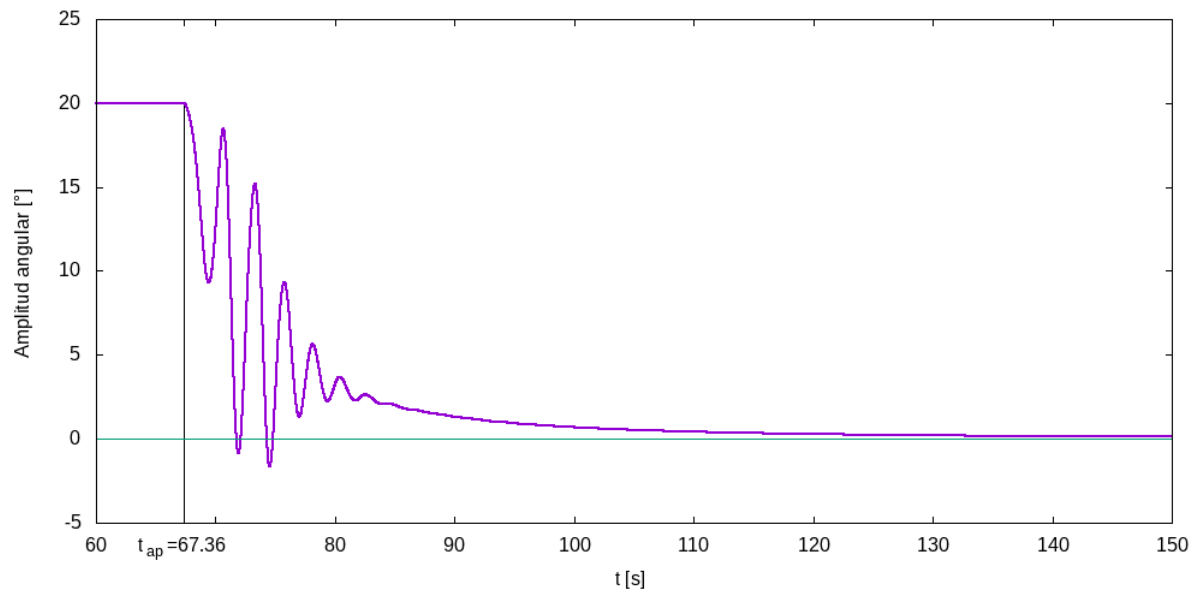
donde la constante *angle\_initial* respresenta el ángulo inicial (en radianes) al cual se encuentra la clapeta en la condición de operación normal, *thcmz* representa el ángulo en el paso de tiempo *n*, *dthz* es el incremento angular en paso de tiempo *n+1*, *wcmz* representa la velocidad angular del sólido en el paso de tiempo *n*, y por último la variable *dwcmz* representa el incremento en velocidad angular en paso de tiempo *n+1*.

En la Figura 5.15 se muestra el torque neto sobre la clapeta a medida que el caudal disminuye en el tiempo.

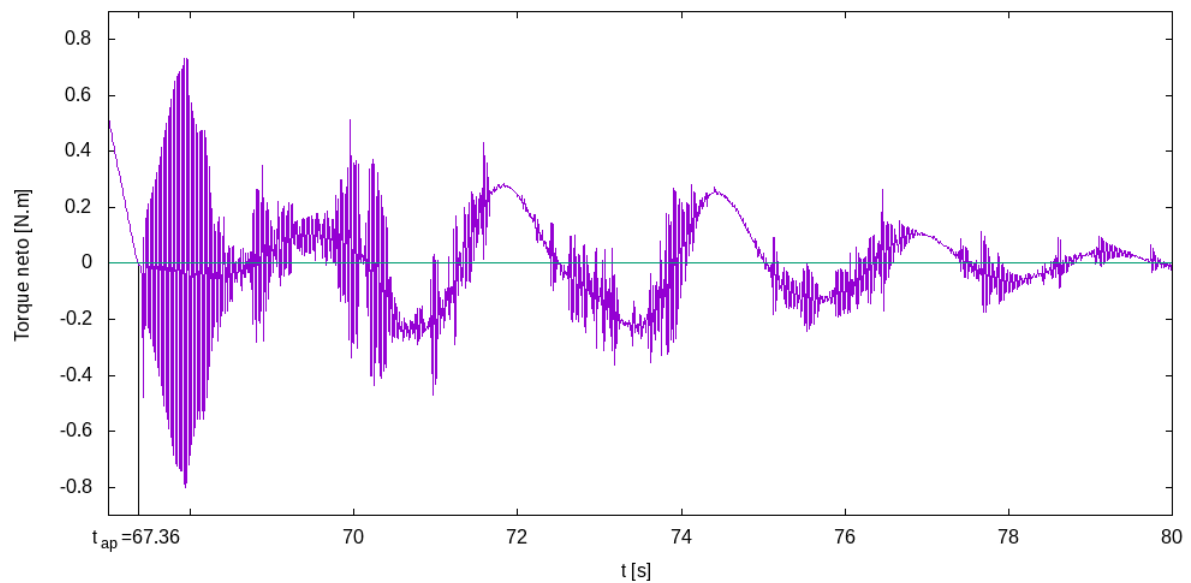


**Figura 5.15:** Torque neto.

A continuación se presentan en la Figura 5.16 el desplazamiento angular del sólido y su correspondiente torque neto.



(a) Amplitud angular



(b) Torque neto

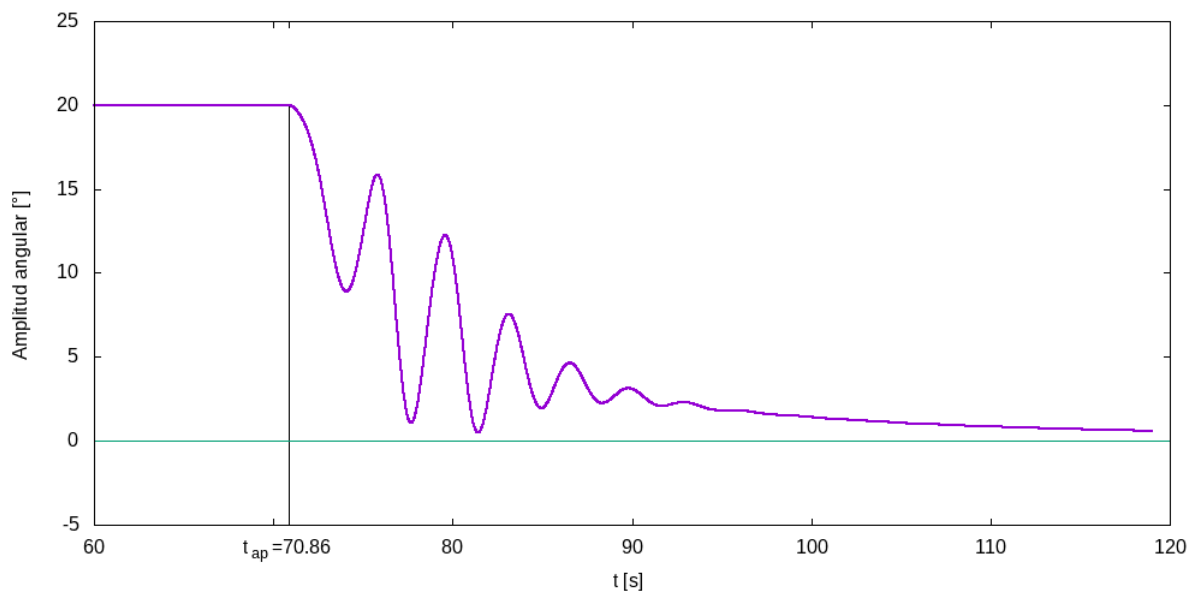
**Figura 5.16:** Evolución temporal del desplazamiento angular y el torque neto durante el transitorio.

Se puede observar que el ángulo máximo de apertura a la que llega la clapeta es de  $1.664^\circ$  hacia la izquierda de la vertical, siendo que en condiciones iniciales la clapeta está  $20$  grados respecto de la vertical.

De un análisis en la velocidad del fluido en un punto que se encuentra dentro de la cavidad (en la zona central) se puede ver que al momento de abrirse la clapeta la magnitud de la velocidad es  $0.03$  m/s aproximadamente, sin embargo la velocidad máxima

después de la apertura de la clapeta es de 0.176 m/s, esto nos lleva a concluir que las velocidades que se generaban dentro de la cavidad previamente eran despreciables frente a las que se obtienen luego de la apertura de la clapeta, aunque la velocidad en condiciones nominales era de 1m/s dentro de la cavidad.

Por último se modificó la masa de la clapeta reduciéndola a la mitad del valor que tenía inicialmente, y se obtuvo como resultado que el tiempo de apertura en este caso es de 10.9 s. Además al tener menos inercia el sólido, y al abrirse a un tiempo mayor, esto es, a un caudal menor, se observa que el mismo no pasa por la posición vertical antes de llegar a la posición de equilibrio final, como era el caso previo.



**Figura 5.17:** Amplitud angular para la clapeta con la mitad de masa.

# Capítulo 6

## Conclusiones y trabajos futuros

### 6.1. Conclusiones

Se evaluaron las capacidades de un código de cálculo de elementos finitos con sólidos inmersos para simular la dinámica de válvulas de accionamiento pasivo.

En una primera etapa se verificó que el código es capaz de reproducir tanto el coeficiente de drag de un sólido inmerso en un fluido como la dinámica de oscilaciones inducidas por desprendimiento de vórtices, obteniéndose resultados con una buena aproximación.

Luego se utilizó la herramienta para la simulación de dispositivos de accionamiento pasivo, estas son las válvulas clapetas, actualmente implementadas en el circuito de refrigeración primario del reactor RA-6.

Se comprobó que el código empleado reproduce razonablemente el momento de apertura de la clapeta, el cual es igual a 7.4 s, a pesar de que se hicieron hipótesis simplificativas muy fuerte como la del uso de la viscosidad dinámica aumentada 1000 veces debido a que el programa no respondía en forma óptima en flujo turbulento, el hecho de despreciar el término de rozamiento mecánico de la bomba ( $m_f$ ), la no implementación de un modelo de turbulencia.

Se observaron algunas dificultades para el caso de la clapeta completamente cerrada, en particular problemas en el cumplimiento de la condición de incompresibilidad. Si bien este es un caso en el cual no es necesario utilizar sólidos inmersos en la simulación, bastando con resolver las ecuaciones del fluido en un dominio constante, puede resultar conveniente utilizar el mismo código durante un transitorio que alterne períodos con la válvula cerrada y abierta.

El algoritmo de paralelización empleado disminuye el tiempo de ejecución, por lo que se implementó esta herramienta computacional en todos los casos.

Se ratificó que al disminuir la masa de la clapeta, el tiempo de apertura de la misma aumenta como se puede observar en la Figura [5.17](#).

## 6.2. Propuestas Futuras

Si bien el código brinda resultados alentadores en cuanto a la reproducción de la dinámica de la interacción entre el sólido inmerso y el fluido, para obtener resultados más realistas será necesario incorporar algún modelo de turbulencia para tratar casos con  $Re$  elevado.

Extensión a 3D.

Se podría incluir una realimentación de caudal que hace referencia al caudal que se establece por convección natural al momento de apertura de la válvula clapeta.

# Apéndice A

## Proyecto y Diseño

Este trabajo se planificó en dos etapas: en el primer cuatrimestre, destinado al proyecto integrador, se validó e implementó el sistema GPFEP desarrollado por el Departamento de Mecánica Computacional del Centro Atómico Bariloche, mientras que en el segundo cuatrimestre en el que el alumno estuvo avocado al proyecto integrador, se estudió la dinámica del movimiento de válvulas de accionamiento pasivo,

En este contexto se hicieron simulaciones en dos dimensiones, debido a que por su bajo costo computacional permitía reproducir diversos casos de interés en poco tiempo. Por lo tanto en todos los casos de análisis se hicieron simulaciones en dos dimensiones.

En la etapa de validación se generó una malla para el fluido y una para el sólido, la cual representaba una geometría que consistía en un cilindro circular inmerso en un canal rectangular.

Se tomó como hipótesis que los cuerpos inmersos se comportan como cuerpos rígidos y que el fluido es incompresible.

Se impusieron condiciones de borde apropiadas para tal caso, y se contrastaron los valores de  $C_D$ ,  $C_L$  y  $S_t$  con la bibliografía.

En la segunda etapa, en cuanto a las válvulas clapeta se refiere, puede inferirse de un análisis en la geometría a simular que ambas válvulas clapeta con las que cuenta el reactor experimental RA-6 son simétricas entre sí, y presentan geometría de revolución, por ello sólo se analizó una de ellas en dos dimensiones.

Se tomó como hipótesis que la válvula clapeta se comporta como sólido rígido, y que el fluido en el cual se encuentra inmerso es incompresible. Se generaron las correspondientes mallas con el especial cuidado de mallar con elementos de menor tamaño en la

zona de interés, es decir, en los alrededores del sólido rígido.

Posteriormente se implementaron condiciones de contorno que variaban en el tiempo para estudiar como afectaban estos cambios en los campos de presión y velocidad sobre el movimiento del sólido rígido.

Se implementaron las ecuaciones de movimiento de cuerpo rígido para simular el movimiento de la clapeta.

Se empleó una formulación híbrida de dominios inmersos/ALE la cual consiste en que los nodos de fluido se muevan arbitrariamente conforme lo hace el sólido (formulación ALE), y además busca representar a la región de que ocupa el sólido como si hubiera un fluido ficticio para el cual se cumplen las ecuaciones de Navier Stokes.

Por último se concluyó que el comportamiento que presenta el código implementado es satisfactorio y que los resultados obtenidos concuerdan con lo que predice la teoría de mecánica de fluidos.



# Bibliografía

- [1] Constant, E., Li, C., Favier, J., Meldi, M., Meliga, P., Serre, E. Implementation of a discrete immersed boundary method in openfoam., 2006. [25](#), [31](#), [32](#), [33](#)
- [2] Blackburn, H., Henderson, R. A study of two-dimensional flow past an oscillating cylinder. *Fluid Mech.*, pág. 385, 1999. [25](#), [31](#), [32](#)
- [3] Pinelli, A., Piomelli, U., Favier, J. Immersed-boundary methods for general finite-difference and finite. *Journal of Computational Physics, Navier-Stokes solvers*, 299, 2010. [31](#), [33](#)
- [4] Tritton, D. Experiments on the flow past a circular cylinder at low Reynolds numbers. *Fluid Mech.*, pág. 6, 1959. [31](#)
- [5] Williamson, C. Vortex dynamics in the cylinder wake. *Annu. Rev. Fluid. Mech.*, pág. 28, 1996. [31](#), [32](#), [33](#)
- [6] Norberg, C. An experimental investigation of the flow around a circular cylinder: influence of aspect ratio. *Fluid Mech.*, pág. 258, 1994. [31](#), [32](#)
- [7] Guimineau, E., Quentey, P. A numerical simulation of vortex shedding from an oscillating circular cylinder. *Fluids Struct.*, pág. 16, 2002. [31](#)
- [8] Barkley, D., Henderson, R. Three-dimensional Floquet stability analysis of the wake of a circular cylinder. *Fluid Mech.*, pág. 332, 1996. [32](#)
- [9] Henderson, R. Details of the drag curve near the onset of vortex shedding. *Phys. Fluid*, **7**, 1995. [32](#)
- [10] Vanella, M., Balaras, E. A moving-least-squares reconstruction for embedded-boundary formulations. *Comput. Phys.*, pág. 228, 2009. [33](#)
- [11] Lu, X., Dalton, C. Calculation of the timing of vortex formation from an oscillating cylinder. *Fluids Struct*, **10**, 1996. [33](#)
- [12] Rajani, B., Kandasamy, A., Sekhar, M. Numerical simulation of laminar flow past a circular cylinder. *Applied Mathematical Modelling*, **33**, 2009. [33](#)

- 
- [13] Qu, L., Norberg, C., Davidson, L., Peng, S., Wang, F. Quantitive numerical analysis of flow past a cylinder circular at reynolds number between 50 and 200. *Journal of Fluids and Structures*, **39**, 2013. [33](#)
- [14] Mittal, R., Balachandar, S. Generation of stramwise vortical structures in bluff body wakes. *Physique Review Letter*, **75**, 1995. [33](#)
- [15] Norberg, C. Pressure force on a circular cylider in cross flow, bluff-body wakes, dynamics and instabilities, 1993. [33](#)
- [16] Wieselsberger, C. New data on the law of hydro and aerodynamics resistance, naca tn. **84**. [33](#)
- [17] Gadur, S. N., Pardo, R. M., Meier, H. Determinación experimental del caudal de refrigeración de un elemento combustible estándar para el núcleo del reactor ra-6. pág. 4, 2017. [44](#)
- [18] Kundu, P. K., Cohen, I. M., Dowling, D. R. Fluid mechanics. **5**, 21–30. [51](#)

# Agradecimientos

A Enzo Dari y Maxi Palacios por darme la oportunidad de trabajar con ellos e insertarme en ramas de la ciencia tan interesante como son mecánica de fluidos y métodos numéricos.

